

# 中国电力百科全书

输 电 与 配 电 卷



中国电力出版社

# 目 录

前言

凡例

输电与配电卷序言

条目分类目录

彩图插页目录

正文 ..... 1~536

条目汉字笔画索引 ..... 537

条目外文索引 (INDEX OF ARTICLES) ..... 543

内容索引 ..... 553

# 条 目 分 类 目 录

## 说 明

一、本目录供分类查检条目之用。

二、有的条目有多种属性，可能在几个分支学科和分类中出现。例如“并联电抗器”条既列入变电所设备分支，又列入并联补偿与串联补偿分支。

三、参见条（虚条）的页码采取虚实条兼注的方式，即参见条页码在括号外，被参见条页码在括号内。

四、凡加有 [ ] 者，不是条目标题，而是分类集合的提示词。例如 [变电所设施]、[配电线路电气设备]。

### [概论]

输配电 .....	407
输配电简史 .....	423
输配电电压等级 .....	411
输配电技术展望 .....	420
输电容量 .....	372
自然功率(见输电容量) .....	535(372)
经济输送容量(见输电容量) .....	278(372)
输电网 .....	373
远距离输电 .....	480
潜供电弧 .....	361
直流输电与交流输电 .....	519
直流输电联网功能(见直流输电与交流输电) .....	501(519)
交直流输电并联运行 .....	267
输电网的无功补偿与电压调整 .....	426
输配电电磁与环境影响 .....	409
输配电技术经济 .....	419
输配电技术标准 .....	412
输配电设施与环境协调 .....	425
架空输电线路 .....	240
输电线路路径选择 .....	398
架空输电线路设计勘测 .....	245
输电线路定位 .....	388

杆塔基础 .....	162
杆塔基础设计 .....	164
杆塔基础施工 .....	166
杆塔基础施工机具 .....	167
杆塔 .....	160
杆塔设计 .....	168
杆塔组立 .....	170
杆塔组立施工机具 .....	172
架空线 .....	248
输电线路导线截面选择 .....	379
导线经济电流密度(见输电线路导线截面选择) .....	92(379)
导线长期允许电流(见输电线路导线截面选择) .....	88(379)
架空地线截面选择 .....	234
架空线力学计算 .....	250
架空线状态方程式(见架空线力学计算) .....	257(250)
代表档距(见架空线力学计算) .....	85(250)
临界档距(见架空线力学计算) .....	311(250)
架线施工 .....	257
架线施工机具 .....	261
输电线路绝缘子(见绝缘子) .....	397(293)
架空输电线路金具 .....	241
输电线路设计用气象条件 .....	399

输电线路电气设计 ..... 386

  输电线路电气参数 ..... 384

  输电线路绝缘设计 ..... 394

    输电线路污秽等级(见输电线路绝缘设计) ..... 403(394)

  输电线路防雷设计(见线路防雷) ..... 389(453)

  输电线路接地设计(见接地装置) ..... 394(273)

  输电线路导线换位 ..... 377

  输电线路电晕 ..... 386

分裂导线 ..... 153

架空线永久性伸长 ..... 256

架空线微风振动 ..... 253

导线次档距振荡 ..... 88

导线覆冰舞动 ..... 88

导线脱冰跳跃 ..... 92

输电线路环境电磁(见输配电电磁与环境影响) ..... 393(409)

  输电线路电场 ..... 383

  输电线路磁场 ..... 374

  输电线路容性耦合影响 ..... 399

  输电线路感性耦合影响 ..... 391

  输电线路阻性耦合影响 ..... 406

  输电线路危险影响 ..... 401

  输电线路干扰影响 ..... 389

  输电线路无线电干扰 ..... 403

  输电线路可听噪声 ..... 397

输电线路通道 ..... 400

输电线路交叉跨越 ..... 394

输电线路巡视检测 ..... 404

输电线路维修 ..... 402

  输电线路带电作业 ..... 375

输电线路故障 ..... 391

架空输电线路可靠性 ..... 244

紧凑型输电线路 ..... 277

输电线路技术经济指标 ..... 393

[输电线路工程实例]

  丰满—李石寨输电线路 ..... 155

  刘家峡—关中输电线路 ..... 312

  平顶山—武昌输电线路 ..... 356

元宝山—锦州—辽阳输电线路 ..... 480

哈尔什龙厄—海尔辛堡输电线路 ... 198

伏尔加格勒—莫斯科输电线路 ..... 156

马尼夸根—蒙特利尔输电线路 ..... 318

埃基巴斯图兹—车里雅宾斯克输电线路 ..... 1

[变电所设施]

变电所 ..... 9

变电所所址 ..... 25

[变电所类型]

  枢纽变电所 ..... 372

  区域变电所 ..... 362

  地区变电所 ..... 96

  终端变电所 ..... 529

  地下变电所 ..... 96

  开关站 ..... 298

  用户变电所 ..... 479

  无人值班变电所 ..... 448

变电所布置 ..... 11

电气主接线 ..... 132

  单母线接线 ..... 86

  单母线分段接线 ..... 86

  单母线分段带旁路母线接线 ..... 86

  双母线接线 ..... 429

  双母线分段接线 ..... 428

  双母线带旁路母线接线 ..... 428

  双母线分段带旁路母线接线 ..... 428

  一个半断路器接线 ..... 474

  三分之四断路器接线 ..... 367

  双断路器接线 ..... 427

  桥形接线 ..... 362

  多角形接线 ..... 147

  变电所主接线可靠性 ..... 31

变电所设备选择 ..... 24

  主变压器选择 ..... 530

  断路器选择 ..... 143

  隔离开关选择 ..... 189

  限流电抗器选择 ..... 451

配电装置 ..... 353

  屋外配电装置 ..... 447



高型屋外配电装置 .....	181
半高型屋外配电装置 .....	2
中型屋外配电装置 .....	527
屋内配电装置 .....	446
气体绝缘金属封闭电器布置 .....	360
母线选择 .....	319
硬母线选择 .....	478
软母线选择 .....	365
全封闭母线选择 .....	363
空气压缩系统 .....	299
变电所二次回路电源 .....	16
变电所自用电 .....	33
变电所主控制楼 .....	32
变电所继电保护 .....	22
变电所二次回路 .....	13
变电所自动化 .....	33
变电所电缆选择 .....	12
控制电缆 .....	300
变电所照明 .....	30
变电所防雷 .....	18
变电所接地装置 .....	23
变电所污秽闪络 .....	28
变电所污秽分级 .....	27
变电所污秽测定 .....	26
变电所带电水冲洗 .....	12
变电所防污涂剂 .....	20
变电所防污型绝缘子(见绝缘子) .....	21(293)
变电所电磁与环境影响(见输配电电磁与环境影响) .....	12(409)
变电所噪声 .....	30
变电所通信 .....	26
变电所运行维护 .....	30
变电所带电作业 .....	12
变电所防火与防爆 .....	18
变电所辅助设施 .....	21
变电所技术经济指标 .....	22
[变电所工程实例]	
繁昌 500kV 变电所 .....	151
天津北郊 500kV 变电所 .....	434
江苏横山 220kV 变电所 .....	262

加拿大皮斯河流域 500kV 变电所 .....	233
德国法兰克福 420kV 西南变电所 .....	93
日本东京电力公司 500kV 变电所 .....	364
[变电所设备]	
电力变压器 .....	123
自耦变压器 .....	534
分裂变压器 .....	152
干式变压器 .....	159
六氟化硫绝缘变压器 .....	313
升压变压器 .....	369
变压器接线组别 .....	39
变压器调压装置 .....	41
变压器冷却 .....	40
变压器油 .....	43
变压器保护 .....	37
变压器运行 .....	45
变压器维护检修 .....	43
变压器故障 .....	38
变压器运输 .....	44
变压器安装 .....	35
变压器试验 .....	41
电抗器 .....	97
限流电抗器 .....	451
并联电抗器 .....	51
中性点电抗器 .....	527
电抗器保护 .....	98
电抗器试验 .....	98
接地变压器 .....	269
消弧线圈 .....	465
电压互感器 .....	135
电流互感器 .....	128
断路器 .....	139
多油断路器 .....	147
少油断路器 .....	369
空气断路器 .....	299
六氟化硫断路器 .....	312
真空断路器 .....	482

大电流断路器 .....	81
磁吹断路器 .....	79
断路器操动机构 .....	140
断路器失灵保护 .....	142
断路器试验 .....	142
隔离开关 .....	188
单柱式隔离开关 .....	87
双柱式隔离开关 .....	429
三柱式隔离开关 .....	368
V 型隔离开关 .....	444
母线接地开关 .....	319
快速接地开关 .....	302
隔离开关操动机构 .....	189
隔离开关试验 .....	189
负荷开关 .....	156
真空接触器 .....	483
高压熔断器 .....	185
组合电器 .....	535
敞开式组合电器 .....	62
气体绝缘金属封闭 电器 .....	359
开关柜 .....	297
敞开式开关柜 .....	62
封闭式开关柜 .....	155
手车式开关柜 .....	371
环网开关柜 .....	201
开关柜试验 .....	297
箱式变电站 .....	463
高压开关设备联锁装置 .....	184
绝缘子 .....	293
悬式绝缘子 .....	471
支柱绝缘子 .....	484
套管 .....	432
变电金具 .....	7
避雷器 .....	4
蓄电池 .....	468
充电装置 .....	69
电气测量仪表 .....	129
交流仪表 .....	265
直流仪表 .....	524
电气设备抗震 .....	131

变电所运动装置 .....	28
<b>配电网 .....</b>	<b>331</b>
城市配电网 .....	63
农村配电网 .....	324
高压配电网 .....	185
中压配电网 .....	528
低压配电网 .....	95
电缆配电网 .....	111
配电网规划 .....	342
配电网负荷特性 .....	339
配电网负荷曲线 .....	338
配电网负荷同时率 .....	341
配电网日负荷率 .....	346
配电网负荷预测 .....	341
配电网负荷密度 .....	338
配电网电压等级 .....	334
配电网网络结构 .....	344
格式网络 .....	186
供电方式 .....	193
两线一地制配电 .....	310
配电网容载比 .....	347
配电网电压调整 .....	334
配电网无功补偿 .....	347
配电网中性点接地方式 .....	348
[配电网管理和运行]	
配电网调度运行 .....	336
配电网调度所 .....	335
配电网调度自动化 .....	337
配电网电能损耗 .....	333
配电网故障 .....	342
配电网计算机辅助管理 .....	343
配电自动化 .....	354
配电线路 .....	349
[配电线路类型]	
高压架空配电线路 .....	183
中压架空配电线路 .....	527
低压架空配电线路 .....	94
接户线与进户线 .....	274
架空配电线路设计施工 .....	237
[配电线路电气设备]	

杆上变压器 .....	159	架空电缆 .....	236
配电线路防雷设施 .....	351	海底电缆 .....	198
杆上隔离开关 .....	160	直流电缆 .....	484
杆上断路器 .....	160	低温有阻电缆 .....	94
跌落式熔断器 .....	138	超导电缆 .....	62
配电线路低压绝缘子 .....	350	电缆电磁场 .....	102
瓷横担 .....	77	电缆电场应力 .....	101
自动分段器 .....	533	电缆电磁屏蔽 .....	102
自动重合器 .....	532	电缆应力锥 .....	120
自动配电开关 .....	533	电缆屏蔽系数 .....	112
绝缘导线 .....	289	[电缆附件及辅助设施]	
配电线路运行检修 .....	352	电缆终端 .....	122
配电变电所 .....	327	环氧电缆终端 .....	201
箱式变电站 .....	463	热缩电缆终端 .....	364
配电变电所运行检修 .....	328	冷缩电缆终端 .....	310
配电变电所噪声 .....	330	预制电缆终端 .....	479
[路灯]		象鼻电缆终端 .....	465
路灯供电方式 .....	314	气体绝缘金属封闭电器电缆	
路灯控制 .....	315	终端 .....	360
路灯照明 .....	316	电缆接头 .....	110
路灯灯具 .....	313	直线电缆接头 .....	525
电力电缆线路 .....	127	绝缘电缆接头 .....	290
电力电缆 .....	127	塞止电缆接头 .....	367
油浸纸绝缘电缆 .....	479	过渡电缆接头 .....	197
粘性浸渍纸绝缘电缆 .....	323	分支电缆接头 .....	155
不滴流电缆 .....	60	电缆软接头 .....	113
带绝缘电缆 .....	85	电缆分支箱 .....	104
屏蔽型电缆 .....	357	充油电缆供油装置 .....	71
分铅型电缆 .....	154	辅助电缆 .....	156
固体挤压聚合电缆 .....	194	导引电缆 .....	93
聚氯乙烯电缆 .....	288	电缆线路控制电缆 .....	117
聚乙烯电缆 .....	288	电缆防火 .....	103
交联聚乙烯电缆 .....	263	耐火电缆(见电缆防火) .....	321(103)
乙丙橡胶电缆 .....	475	阻燃电缆(见电缆防火) .....	535(103)
自容式充油电缆 .....	535	电缆防火槽(见电缆防火) .....	104(103)
充气电缆 .....	70	电缆防火带(见电缆防火) .....	104(103)
钢管电缆 .....	176	电缆线路设计 .....	118
钢管充油电缆 .....	175	电缆线路路径选择 .....	117
钢管压气电缆 .....	176	电缆选型 .....	119
压气(SF <sub>6</sub> )绝缘电缆 .....	474	充油电缆油路分段 .....	72
		电缆供油装置允许供油压力计算 .....	107

电缆线路电气参数 .....	115	换流 .....	202
电缆安装 .....	99	换流电路 .....	205
电缆直埋敷设 .....	121	换流器 .....	209
电缆排管敷设 .....	111	换相 .....	229
电缆沟敷设 .....	108	换流器运行特性 .....	219
电缆隧道敷设 .....	114	换流器工况图 .....	213
电缆竖井敷设 .....	114	直流输电系统运行特性 .....	516
电缆层敷设 .....	100	[换流设备]	
电缆蛇形敷设 .....	113	换流单元 .....	204
海底电缆敷设 .....	198	换流阀 .....	205
充油电缆安装 .....	70	换流阀触发系统 .....	207
电缆敷设计算 .....	104	晶闸管阀辅助电路 .....	278
电缆安装机具 .....	99	直流输电系统控制 .....	510
电缆牵引端 .....	113	换流器触发相位控制 .....	212
电缆导体连接 .....	100	直流输电控制系统分层结构 .....	500
电缆线路交接试验 .....	116	直流输电控制方式 .....	498
电缆线路运行维护 .....	119	多端直流输电系统控制 .....	146
电缆线路技术资料 .....	115	[直流输电系统运行操作]	
电缆线路巡视检查 .....	119	直流输电系统起停 .....	512
电缆线路外力破坏防护 .....	118	直流输电系统自动再启动 .....	518
电缆预防性试验 .....	121	潮流反转 .....	63
电缆故障 .....	108	换流器闭锁和解锁 .....	212
电缆故障测寻 .....	108	换流器旁路 .....	218
电缆故障修理 .....	110	直流输电系统谐波 .....	514
[高压电缆线路工程实例]		换流站交流滤波装置 .....	224
北京电缆隧道工程 .....	2	换流站直流滤波装置 .....	227
上海闸北—杨树浦电缆工程 .....	368	[换流站的其它设备和设施]	
厦门集美—高崎海底电缆工程 .....	450	换流站主接线 .....	227
大古力 525kV 电缆工程 .....	85	平波电抗器 .....	356
直流输电 .....	490	换流变压器 .....	203
[基本概念]		换流站无功功率补偿设备 .....	226
背靠背直流耦合系统 .....	3	换流站避雷器 .....	221
多端直流输电系统 .....	145	直流线路振荡阻尼电路 .....	524
换流站 .....	221	换流站冲击波吸收电容器 .....	222
直流输电线路 .....	519	换流站高频阻塞装置 .....	223
直流架空线路 .....	489	直流电流互感器 .....	485
直流电缆线路 .....	485	直流电压互感器 .....	486
回流方式 .....	232	阀电流断点检测装置 .....	149
直流输电接地电极 .....	497	换流站开关设备 .....	225
直流线路电参数 .....	521	直流断路器 .....	487
		直流输电远动通信设施 .....	520

换流站辅助设施 .....	222
阀厅 .....	150
换流站平面布置 .....	226
[直流输电系统的故障]	
换流器故障 .....	215
换流站交流部分故障 .....	223
直流线路故障 .....	523
逆变侧交流电网故障 .....	323
整流侧交流电网故障 .....	483
直流输电系统继电保护 .....	506
[直流输电高电压技术]	
直流输电电磁与环境影响 .....	494
直流输电系统过电压 .....	503
直流输电系统绝缘配合 .....	508
直流输电系统可靠性 .....	509
直流输电工程系统试验 .....	495
直流输电系统运行维护 .....	517
直流输电系统动态模拟 .....	502
直流输电系统仿真装置 .....	502
直流输电系统数字仿真 .....	513
直流输电系统计算 .....	504
[直流输电工程实例]	
哥得兰直流输电工程 .....	186
英法海峡直流输电工程 .....	477
新信浓变频站 .....	467
伊尔河非同步联络站 .....	474
太平洋联络线 .....	432
卡布拉巴萨直流输电工程 .....	294
伊泰普直流输电工程 .....	475
魁北克—新英格兰直流互联 系统 .....	303
埃基巴斯图兹—苏联欧洲部分 中心直流输电工程 .....	1
舟山直流输电工程 .....	529
葛洲坝—上海直流输电工程 .....	190
[并联补偿与串联补偿]	
并联补偿装置 .....	46
同步调相机 .....	436
同步调相机励磁 .....	438
同步调相机起动方法 .....	440

同步调相机继电保护 .....	438
同步调相机运行控制 .....	442
同步调相机故障 .....	437
同步调相机检修 .....	438
同步调相机试验 .....	441
并联电容器 .....	54
并联电容器组接线 .....	57
并联电容器组继电保护 .....	56
并联电容器组控制装置 .....	58
[并联电容器组配套]	
并联电容器组一次配套 设备 .....	58
并联电容器组成套装置 .....	56
并联电容器组运行维护 .....	59
并联电容器试验 .....	56
并联电抗器 .....	51
并联电抗器继电保护 .....	52
并联电抗器控制装置 .....	53
并联电抗器运行检修 .....	54
并联电抗器试验 .....	53
静止补偿装置 .....	282
[静止补偿装置类型]	
可控饱和电抗器型静止补偿 装置 .....	298
自饱和电抗器型静止补偿 装置 .....	531
晶闸管控制电抗器型静止 补偿装置 .....	280
晶闸管控制变压器型静止 补偿装置 .....	280
晶闸管投切电容器型静止 补偿装置 .....	281
静止补偿滤波装置 .....	282
静止补偿装置继电保护 .....	284
静止补偿装置运行检修 .....	286
静止补偿装置试验 .....	285
静止无功发生器 .....	286
串联补偿装置 .....	74
串联补偿装置保护 .....	75
串联补偿系统谐振 .....	73
串联补偿装置运行检修 .....	76

串联补偿装置试验 .....	76
<b>过电压</b> .....	195
雷电 .....	304
雷云 .....	309
雷云放电过程 .....	309
先导(见雷云放电过程) .....	451(309)
迎面先导(见雷云放电过程) .....	478(309)
主放电(见雷云放电过程) .....	531(309)
下行雷(见雷云放电过程) .....	450(309)
上行雷 .....	368
球雷 .....	362
雷电观测 .....	306
雷电参数 .....	304
[雷电测量仪器]	
磁钢棒 .....	79
电花仪 .....	96
陡度仪 .....	139
高速摄影机 .....	180
变像仪 .....	35
雷电观测站 .....	306
雷电定位系统(见雷电观测站) .....	306(306)
雷电过电压 .....	308
直击雷过电压 .....	484
感应雷过电压 .....	175
内部过电压 .....	321
暂时过电压 .....	482
工频过电压 .....	192
甩负荷过电压 .....	427
谐振过电压 .....	466
线性谐振过电压 .....	462
铁磁谐振过电压 .....	435
断线谐振过电压 .....	144
电压互感器饱和过电压 .....	136
非全相运行过电压 .....	152
参数谐振过电压 .....	61
相序翻转(见断线谐振	

过电压) .....	465(144)
电容传递过电压 .....	134
操作过电压 .....	62
弧光接地过电压 .....	200
开断电感负载过电压 .....	294
开断电容负载过电压 .....	295
合闸过电压 .....	200
解列过电压 .....	275
内部过电压测量 .....	321
过电压计算 .....	196
[基本名词]	
波阻抗 .....	60
波速 .....	60
行波 .....	467
波衰减 .....	59
波变形 .....	59
彼德逊法则 .....	4
等值波法则 .....	94
网格法 .....	445
特性线法 .....	433
贝热龙法(见特性线法) .....	3(433)
相模变换法 .....	464
过电压模拟 .....	196
[过电压保护设备与设施]	
避雷针 .....	6
避雷线 .....	5
架空地线(见避雷线) .....	233(5)
绕击电气几何模型(见避雷线) .....	364(5)
消雷器 .....	466
保护间隙 .....	2
击穿保险器 .....	233
避雷器 .....	4
阀式避雷器 .....	149
普通阀式避雷器 .....	357
磁吹避雷器 .....	78
金属氧化物避雷器 .....	276
复合避雷器 .....	157
管式避雷器 .....	195
避雷器试验 .....	4
消弧线圈 .....	465

并联电抗器 .....	51
电气装置防雷 .....	133
[基本名词]	
反击 .....	152
耦合系数 .....	326
分流系数 .....	154
耐雷水平 .....	321
雷击跳闸率 .....	308
入口电容 .....	365
危险波曲线 .....	446
正变换过电压 .....	484
反变换过电压 .....	152
线路防雷 .....	453
耦合地线 .....	326
连续地线 .....	310
变电所防雷 .....	18
单芯电缆护层过电压保护 .....	87
旋转电机防雷 .....	472
配电变压器防雷 .....	330
<b>绝缘配合</b> .....	291
绝缘配合惯用法 .....	291
绝缘配合统计法 .....	292
绝缘配合简化统计法 .....	291
绝缘水平 .....	293
线路绝缘水平 .....	459
爬电比距 .....	327
污闪 .....	446
雾闪 .....	449
电气设备绝缘水平 .....	130
外绝缘 .....	445
内绝缘 .....	323
全波冲击绝缘水平 .....	362
截波冲击绝缘水平 .....	275
操作冲击绝缘水平 .....	61
工频耐受电压 .....	193
<b>接地</b> .....	268
土壤电阻率 .....	442
四极法 .....	430
接地电阻 .....	270

冲击接地阻抗 .....	68
接地电阻测量 .....	272
远离法(见接地电阻测量) .....	481(272)
补偿法(见接地电阻测量) .....	60(272)
降阻剂 .....	262
接地装置 .....	273
交流地网 .....	264
直流输电接地电极 .....	497
跨步电压 .....	301
跨步电动势(见跨步电压) .....	301(301)
接触电压 .....	267
接触电动势(见接触电压) .....	267(267)

### [实验基地]

高电压实验室 .....	178
--------------	-----

### [高电压实验设备]

试验变压器 .....	370
高电压谐振试验装置 .....	180
冲击电压发生器 .....	66
截波装置 .....	275
直流高电压发生器 .....	488
冲击电流发生器 .....	65
高电压测量装置 .....	177
高电压实验室接地 .....	179
高电压实验室屏蔽 .....	179
试验线段 .....	371
电晕试验笼 .....	138
高压电力设备绝缘试验 .....	181
绝缘电阻测量 .....	290
介质损耗因数测量 .....	276
局部放电试验 .....	287
交流电压试验 .....	264
冲击电压试验 .....	67
直流电压试验 .....	486
复合电压试验 .....	157

### [其他高电压试验]

干试验 .....	159
湿试验 .....	370
人工污秽试验 .....	364
绝缘寿命试验 .....	292
电晕试验 .....	137

电压分布试验 ..... 134

高压电器无线电干扰试验 ..... 183

大功率实验站 ..... 81

网络试验站 ..... 445

冲击同步发电机试验站 ..... 68

振荡回路试验站 ..... 483

大功率试验 ..... 82

大功率试验方法 ..... 84

大功率试验参数 ..... 83

开断与关合试验 ..... 295

线路力学实验站 ..... 462

线路杆塔基础试验 ..... 455

线路杆塔试验 ..... 456

线路导线试验 ..... 452

线路金具试验 ..... 458

[实验基地实例]

列宁格勒国立工业大学高电压实  
验室 ..... 311

意大利电工技术试验中心高压实  
验室 ..... 476

魁北克水电局研究所高压实验室 ... 303

法国电力公司高压实验室 ..... 151

苏联直流输电研究院高压技术部 ... 431

武汉高压研究所高压实验室 ..... 449

意大利电工技术试验中心大功  
率实验站 ..... 476

雷纳第大功率实验站 ..... 308

荷兰 KEMA 大功率实验站 ..... 200

苏联北方大功率实验站 ..... 430

魁北克水电局研究所大功率实  
验站 ..... 302

西安高压电器研究所大功率实  
验站 ..... 450

中国电力科学研究院大功率实  
验站 ..... 526

美国电力研究所输电线路力学  
实验场 ..... 318

意大利 Lecco 铁塔实验站 ..... 476

中国电力建设研究所线路杆塔  
实验站 ..... 526



# 彩图插页目录

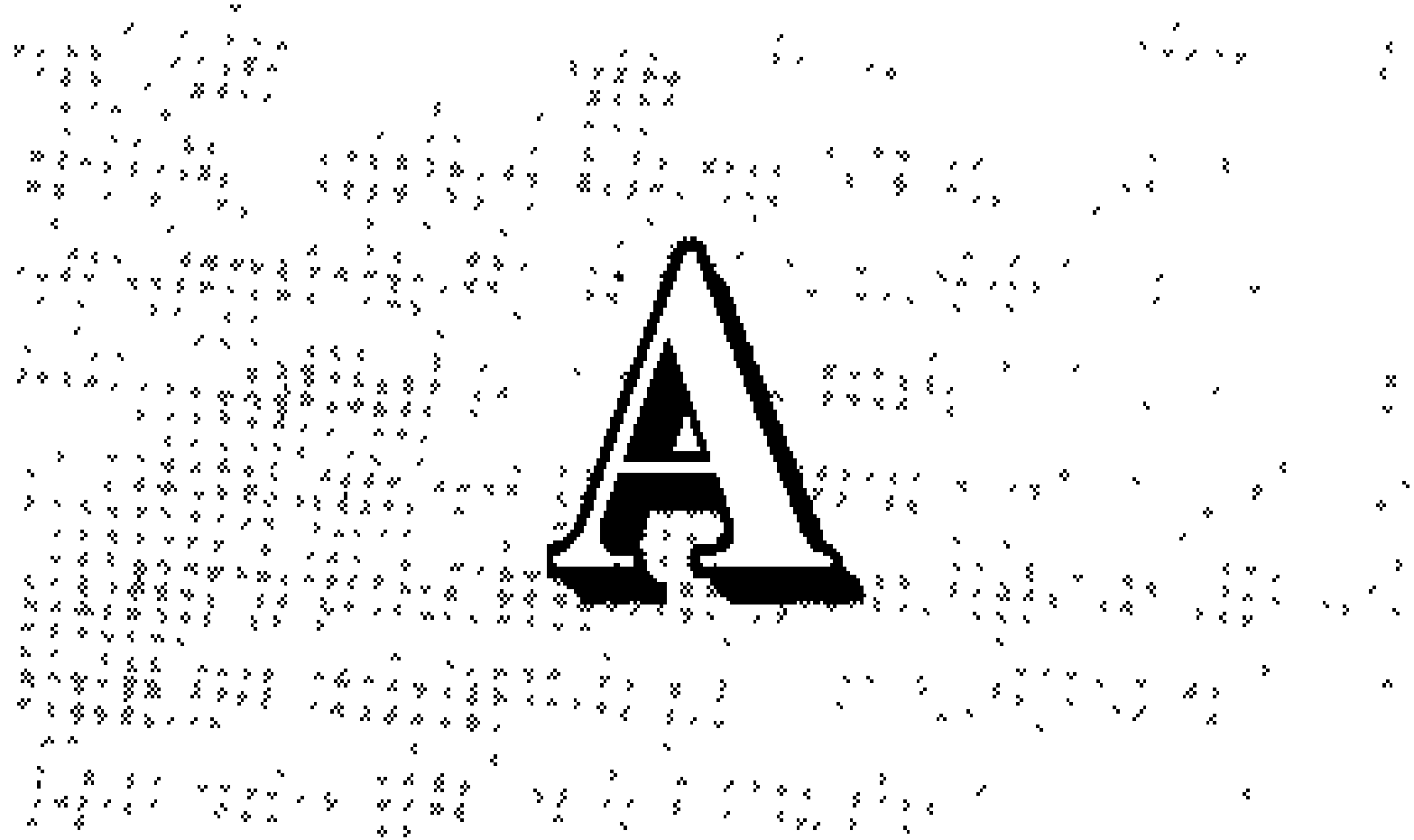
1. 施工中的超高压架空输电线路 .....	1	作业 .....	6
2. 苏联 1150 kV 架空输电线路试验段 .....	1	22. 科研人员进行超高压输电线路对电视干扰的模拟试验 .....	7
3. 莫斯科—列宁格勒 750 kV 交流输电线路在建设中 .....	1	23. 耐张线夹 .....	7
4. 雷电对架空输电线路会引起过电压危害 .....	2	24. 四分裂间隔棒 .....	7
5. D 型 220 kV 终端铁塔 .....	2	25. 单片绝缘子 .....	7
6. 330 kV 预应力拔梢混凝土电杆 .....	2	26. 架空输电线路金具 .....	7
7. 中国自行设计和施工的第一条 220 kV 丰满—李石寨输电线路 .....	3	27. 六氟化硫气体绝缘三相单回输电线路 .....	8
8. 平顶山—武昌 500 kV 输电线路长江金口大跨越 .....	3	28. 六氟化硫气体绝缘三相双回并列输电线路 .....	8
9. 平顶山—武昌 500 kV 输电线路终端换位铁塔 .....	3	29. 加拿大皮斯河流域 500 kV 变电所的 500 kV 配电装置 .....	9
10. 安徽荻港长江岸边的过江铁塔 .....	4	30. 秦安变电所 330 kV 屋外配电装置 .....	9
11. 采用 45 t 吊车组立铁塔 .....	4	31. 繁昌 500 kV 变电所的西门子公司 500 kV 断路器及屋外配电装置构架 .....	10
12. 元宝山—锦州—辽阳 500 kV 输电线路 .....	4	32. 500 kV 武昌凤凰山变电所全景 .....	10
13. 中国首山变电所 220 kV 终端铁塔 .....	4	33. 天津北郊 500 kV 变电所的 220 kV 配电装置 .....	11
14. 利用直升飞机分段组立铁塔 .....	5	34. 刘家峡水电站 330 kV 地下开关站 .....	11
15. 耸立在中国青海高原上的 330 kV 输电线路拉线 V 型铁塔 .....	5	35. 株洲云田 500 kV 变电所主控制室 .....	11
16. 等电位骑飞车巡视修补 500 kV 线路导线 .....	5	36. 葛洲坝水电站 500 kV 升压站，联络变压器容量 360 MV·A .....	12
17. 架线高空作业 .....	5	37. 高压配电装置 .....	12
18. 500 kV 双回输电线路黄河大跨越施工现场 .....	6	38. 300 kV 六氟化硫气体绝缘变电所 .....	12
19. 施工中的架空输电线路绝缘子与金具 .....	6	39. 300 kV 串联补偿电容器组，容量为 432 Mvar，ABB 公司生产 .....	13
20. 沿绝缘子串进入强电场更换单片绝缘子 .....	6	40. 位于加拿大沙穆乔纳 (Chamouchouane) 的静止补偿装置，四	
21. 用绝缘梯进入强电场进行带电			

个站的总功率为 $2 \times 330 \text{ Mvar}$ , ABB 公司生产 .....	13	59. 法国 MG 公司生产的安装在中国 上海南桥换流站的 $500 \text{ kVOH}$ 型 隔离开关, 照片上后部安装于地 面的为 $500 \text{ kV}$ 六氟化硫断路器 .....	19
41. 安装于秦安变电所的 $330 \text{ kV}$ 串联电容补偿装置 .....	13	60. JDCF-220WB 型电压互感器 .....	20
42. 安装在 $500 \text{ kV}$ 变电所中的静 止补偿装置 .....	14	61. LB10、11-220 WB 型电流互 感器 .....	20
43. $500 \text{ kV}$ 凤凰山变电所安装现场 .....	14	62. $500 \text{ kV}$ 、 $2000 \text{ A}/4000 \text{ A}$ 、 $50 \text{ kA}$ 落地罐式六氟化硫断路器 .....	20
44. 变电所带电水冲洗绝缘子 .....	14	63. 奥地利伊林公司生产的 $420 \text{ kV}$ 剪刀式隔离开关 .....	21
45. $400/230 \text{ kV}$ 、 $300 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 三 相强迫油导向循环风冷变压器 .....	15	64. 六氟化硫气体绝缘高压套管 .....	21
46. $400/225 \text{ kV}$ 、 $600 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 与六 氟化硫气体绝缘金属封闭母线 连接的三相自耦变压器 .....	15	65. 美国 ABB 公司生产的 VD4 型真空断路器 .....	21
47. 奥地利伊林公司生产的 $250$ $\text{MV} \cdot \text{A}$ 钟罩式变压器正在进行 最后组装 .....	15	66. 苏联使用的 $1150 \text{ kV}$ 空气断 路器 .....	22
48. 英国皮布尔电力变压器厂生产 的单相多芯铁芯, 三个这样的 铁芯组成一台 $23.5/432 \text{ kV}$ 、 $800 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的升压变压器 .....	15	67. 电压等级为 $35 \sim 550 \text{ kV}$ 、额定 电流为 $600 \sim 5000 \text{ A}$ 的水平双 断口隔离开关 .....	22
49. $750 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 、 $550/240 \text{ kV}$ 自 耦变压器的整体铁芯和绕组, 三台有载调压装置安装在右侧 .....	16	68. F&G 公司生产的 GA 型六氟化 硫气体绝缘环网开关柜结构 .....	22
50. 三相 $340 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 、 $18/420 \text{ kV}$ 升压变压器整体铁芯 .....	16	69. 负荷开关内部结构 .....	23
51. 变压器有载调压装置 .....	16	70. 封闭式开关柜内部结构 .....	23
52. $360 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 带有载调压装置 的电力变压器 .....	17	71. 安装在变电所内的手车式开关 柜 .....	23
53. $500 \text{ kV}$ 变压器有载调压装置吊 芯检修 .....	17	72. ABB 公司生产的 ZS1 型金属 铠装手车式开关柜 .....	24
54. 苏联的 $1150 \text{ kV}$ 自耦变压器 .....	18	73. 日本三菱公司生产的 $300 \text{ kV}$ GIS .....	24
55. 苏联的 $1150 \text{ kV}$ 单相并联电 抗器 .....	18	74. 安装在变电所中的 $245 \text{ kV}$ GIS .....	24
56. JBZ 系列 $500 \text{ kV}$ 变压器保护 装置 .....	18	75. $110 \text{ kV}$ 半屋内式配电变电所 部分配电装置 .....	25
57. 日本日新电机株式会社生产的 三相 $66.5 \text{ kV}$ 、 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 并 联电抗器 .....	19	76. 改造后的郑州 $110 \text{ kV}$ 环形城 市配电网 .....	25
58. 并联电抗器的铁芯及绕组 .....	19	77. 配电变压器 .....	26
		78. 环氧树脂浇注的配电变压器 .....	26
		79. $110 \text{ kV}$ 钢管双回架空配电线路 .....	26
		80. $10 \text{ kV}$ 低压合杆配电线路及	

10 kV/380 V 杆上配电变压器 .....	26	107. 南桥换流站中换流变压器组， 由三只单相三绕组变压器组 成，单台容量 230 MV·A，电 压为 $230/\sqrt{3} : 198/\sqrt{3} :$ 198 kV，带有载调压装置，由 德国 TU 公司生产 .....	34
81. 河南信阳高压开关总厂生产的 10 kV ZW1-10 型户外真空 断路器 .....	27	108. 安装在南桥换流站的中性线回 路直流电流互感器 .....	35
82. 各类配电用高低压绝缘子 .....	27	109. 瑞士 ABB 公司生产的空芯式 500 kV 直流平波电抗器，每 只电感为 150 mH，每极为二 只串联，两端并联有避雷器 .....	35
83. 北京第三开关厂生产的 RW10 -10F 型跌落式熔断器 .....	27	110. 英国皮布尔电力变压器厂生产 的换流变压器直流侧铁芯和绕 组 .....	35
84. F&G 公司生产的 GKS 混凝土 底座金属外壳型箱式变电站 .....	27	111. 南桥换流站直流开关场全景 .....	36
85. 落地式混凝土结构的箱式变 电站 .....	27	112. 瑞典丹纳堡换流站的直流场地， 左边与直流穿墙套管连接的是 平波电抗器，右边为直流滤波 装置 .....	36
86. 上海火车站出口处广场高杆路 灯照明 .....	28	113. 中国电力科学研究院的直流输 电模拟装置 .....	36
87. 城市道路照明 .....	28	114. 苏联士 750 kV 双极高压直流 架空输电线路，每极为五分裂 导线 .....	37
88. 110 kV 交联聚乙烯电缆结构 .....	29	115. 葛洲坝—上海士 500 kV 双极高 压直流架空输电线路，每极采 用四分裂导线，杆塔采用拉线 铁塔 .....	37
89. 交联聚乙烯绝缘钢带铠装电缆 结构 .....	29	116. 葛洲坝换流站站房及户外设 备场 .....	37
90. 500 kV 自容式充油电缆截面 .....	29	117. 葛洲坝—上海士 500 kV 直流输 电工程吉阳长江大跨越施工中 利用直升飞机放线 .....	38
91. 钢管充油电缆截面 .....	29	118. 葛洲坝换流站主控制室 .....	39
92. 钢管压气电缆截面 .....	29	119. 葛洲坝换流站阀厅，换流阀 由 BBC 公司生产 .....	39
93. 直流电缆截面 .....	29	120. 南桥换流站阀厅，换流阀采用 西门子公司的产品 .....	40
94. 各种充油海底电缆样品 .....	30		
95. 台湾宏泰电工股份有限公司生 产的各种电力电缆样品 .....	30		
96. 安装在电缆隧道中的六氟化硫 气体绝缘电缆 .....	31		
97. 220 kV 不同类型电缆的连接箱 .....	31		
98. 500 kV 屋外电缆终端 .....	31		
99. 110 kV 电力电缆正在安装施工 .....	31		
100. 变电所电缆夹层中的电力电缆 .....	32		
101. 海底电缆沟 .....	32		
102. 海底电缆管道 .....	32		
103. 厦门集美—高崎海底电缆工程， 敷设船正在敷设海底电缆 .....	32		
104. 日本日立公司制造的座装式晶 闸管换流阀 .....	33		
105. 瑞典通用电气公司生产的四阳 极汞弧换流阀 .....	33		
106. 晶闸管换流阀组件 .....	34		

121. 日本新信浓变频站户外式油浸 油冷晶闸管换流阀 .....	40	129. 装设在高电压实验室中的各种 高压试验装置 .....	44
122. 舟山直流输电工程中采用的 KGGS-500/100 型晶闸管双 重阀 .....	40	130. 意大利电工技术试验中心高电 压实验室 .....	44
123. 自然界中的雷电对屋外电力设 施与设备会产生过电压的危害 .....	41	131. 列宁格勒国立工业大学高电压 实验室的工频试验装置 .....	45
124. 中国电力科学研究院 6000 kV 空气间隙冲击电压放电试验, 图中的四条弧光通道为四次试 验的结果 .....	42	132. 苏联直流输电研究院高电压户 外试验场一角 .....	45
125. 6000 kV 冲击电压发生器, 由 中国电力科学研究院高压所设 计制造 .....	42	133. 大功率试验装置 .....	45
126. 树脂浇注绝缘的试验变压器 .....	42	134. 荷兰 KEMA 大功率实验站 俯瞰 .....	46
127. 中国武汉高压研究所的工频试 验装置 .....	43	135. 意大利电工技术试验中心大功 率实验站全景 .....	46
128. 中国电力科学研究院户外式 ±1000 kV 直流高电压发生器 .....	43	136. 加拿大魁北克水电局大功率实 验站 (部分) .....	47
		137. 电动力试验装置 .....	47
		138. 输电线路铁塔加荷试验 .....	48
		139. 在环境实验室中进行淋雨覆冰 试验 .....	48

本卷彩色图片,除部分注明摄影者或提供者外,其余均取自国内外出版物或各种资料,不一一备载。



Aijibasituzi - Cheliyabinsike shudian xianlu  
**埃基巴斯图兹—车里雅宾斯克输电线路**  
(Erkibastuz - Cheliabinsk transmission line)

世界上第一条 1150 kV 输电线路。该线路由哈萨克斯坦的埃基巴斯图兹火电厂引出，经科克切塔夫、库斯坦奈至俄罗斯的车里雅宾斯克，全长 1228 km，设计输送容量为 5500 MW。

这项工程分三个阶段建设。第一阶段为埃基巴斯图兹—科克切塔夫线路，长 497 km，将埃基巴斯图兹火电厂的电力西送约 2500 MW，于 1985 年 5 月按 1150 kV 投运。第二阶段为科克切塔夫—库斯坦奈线路，长 411 km，于 1985 年底按 1150 kV 投运。第三阶段为库斯坦奈—车里雅宾斯克线路，长 328 km，于 1990 年建成，暂按 500 kV 降压运行，以后再升压到 1150 kV。全线建成后，将连接西伯利亚、哈萨克斯坦和乌拉尔联合电力系统，并可向中亚细亚和中部联合电力系统发展，预计升压后全长为 1228 km。

第一阶段和第二阶段建设的 1150 kV 线路的导线均为每相八分裂 AC330/43 正常型钢芯铝绞线，第三阶段线路的导线为八分裂的 AC300/48 正常型钢芯铝绞线。子导线布置在直径 1.5 m 的圆周上，相邻子导线间距为 40 cm。该线路的直线杆塔全部采用拉线 V 型塔，标准塔高 46 m，塔重 21.56 t。耐张杆塔采用 4 柱自立式，其基础为预制的蘑菇型钢筋混凝土台座。该线路档距为 400 m，导线水平排列，线路绝缘水平按内部过电压为 1.8 倍相电压设计，相间距离为 23.4m。边导线使用 30.6 t 级悬垂玻璃绝缘子串，中导线使用 40.8 t 级 V 型玻璃绝缘子串。耐张绝缘子串由四个 30.6 t 级玻璃绝缘子串并联组成。架空地线由双分裂 AC70/72 正常型钢芯铝绞线组成，对边导线保护角为 22°~25°。架空地线用瓷绝缘子对地绝缘，同时作为高频载波通道。

该线路施工机械化水平较高，大量使用了挖土机、推土机、吊车、拖拉机、牵张机、升降机等施工机械，平均施工耗工量为 702 工日/km。铁塔钢材消耗量为 60.8 t/km，导线消耗量为 31 t/km，预制钢筋混

凝土量为 32.2m<sup>3</sup>/km，线路单位造价为 164.1 千卢布/km。

(胡维新)

Aijibasituzi Sulian Ouzhou bufen zhongxin zhiliu shudian gongcheng

**埃基巴斯图兹—苏联欧洲部分中心直流输电工程**  
(Erkibastuz - central area of European part of USSR HVDC project)

采取直流方式将埃基巴斯图兹电厂用廉价煤炭生产的电能传输到苏联欧洲部分中心地区的输电工程。在工程设计中也考虑了反向送电的可能性，以满足苏联统一电力系统运行的需要。两端的换流站分别建在埃基巴斯图兹和塔姆波夫。它是目前世界上正在建设的规模最大的直流输电工程。其基本参数为：输电电压±750 kV，输送电流 4000 A，输送容量 6000 MW，输送距离 2414 km。

本工程的最大特点是：极换流器都由两组 12 脉动换流器以及相应与之串联的平波电抗器并联构成，两组可并联使用，输送低功率时也可只用其中一组。

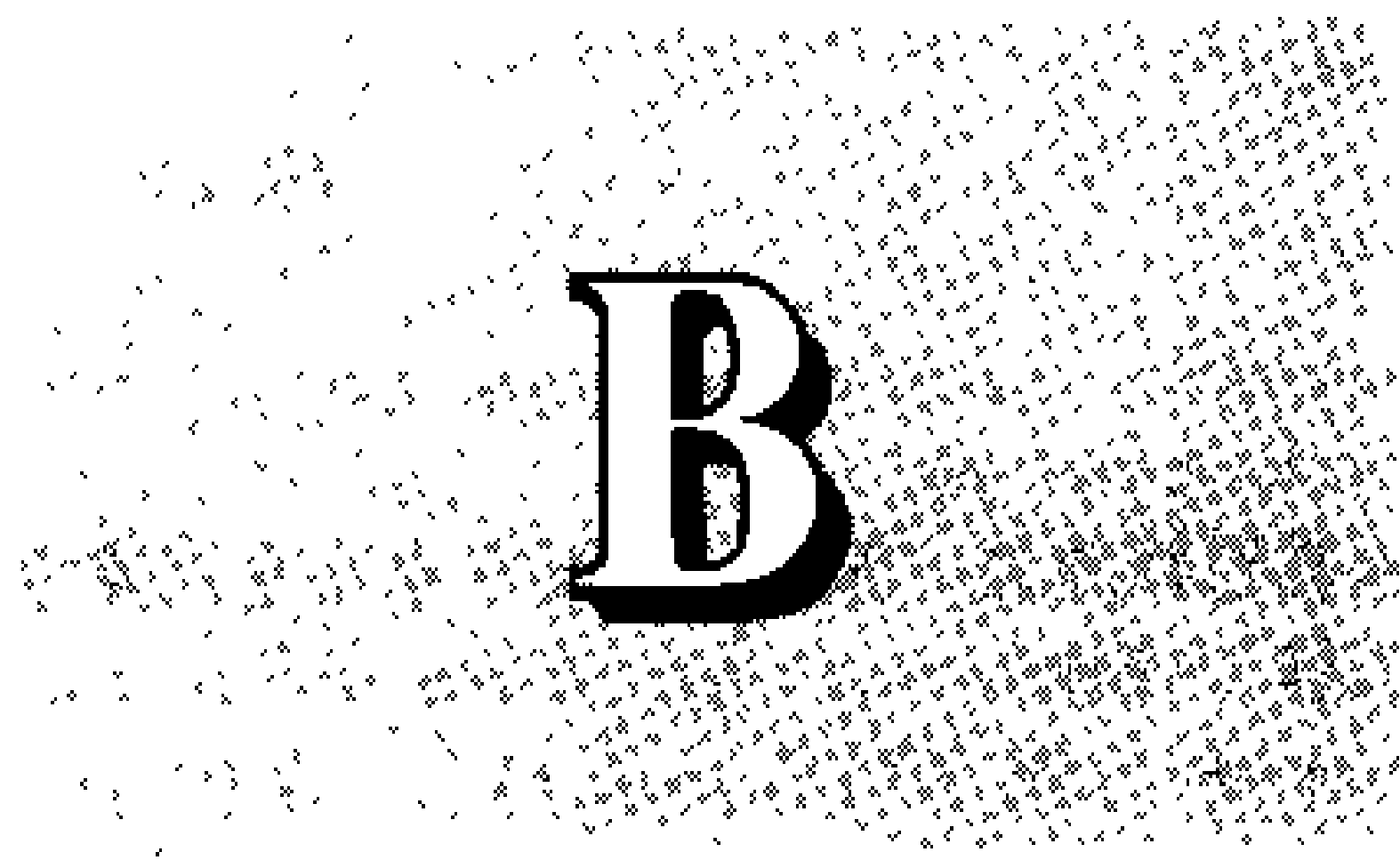
本工程主要设备的技术参数见表。

主要设备的技术参数

设备名称		埃基巴斯图兹换流站	塔姆波夫换流站
换流阀		晶闸管阀，水冷，光触发	晶闸管阀，水冷，光触发
换流变压器		3×320 MV·A，520/310 kV，有分接开关自动调节	3×320 MV·A，520/310 kV，有分接开关自动调节
平波电抗器		每极两台并联，每台电感为 4 H	每极两台并联，每台电感为 4H
无功补偿与滤波装置	电容器组	无	4×650 Mvar
	同步调相机	无	4×320 Mvar
	交流滤波器	5、11、13 次单调谐滤波器，高通滤波器	5、11、13 次单调谐滤波器

本工程的±750 kV 直流架空线路采用带拉线的 T 型铁塔，每极的分裂导线由 5 根截面为 1200 mm<sup>2</sup> 的钢芯铝线构成，排列在等边五角形的顶点上，分裂间距为 600 mm。绝缘子串由两串并联组成，每串有 52 片 PC-300 型玻璃绝缘子。

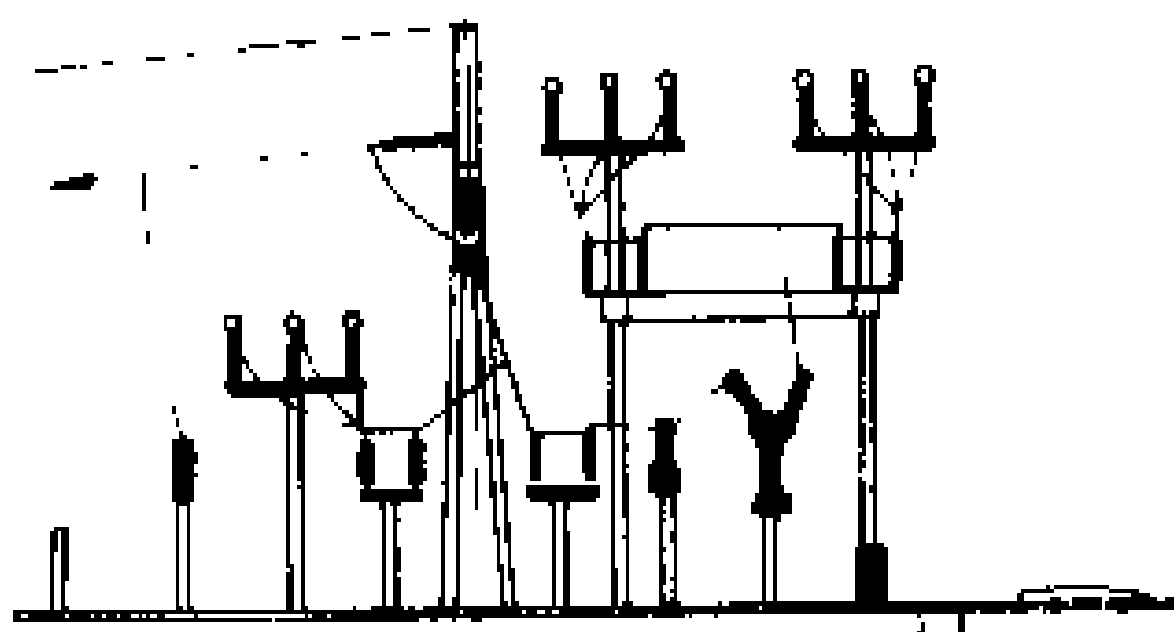
(赵晓君 邢俊杰 赵智大)



bangaoxing wuwai peidian zhuangzhi  
**半高型屋外配电装置** (semi-high arrangement of outdoor switchgear) 母线架设在电气设备上方，母线隔离开关与其他电气设备双层布置的屋外配电装置。这种配电装置呈三层布置，上层为母线，中层为母线隔离开关，下层为断路器、电流互感器、电压互感器、避雷器以及出线隔离开关等电气设备。半高型屋外配电装置可以适用于单母线接线、单母线带旁路母线接线、双母线接线和双母线带旁路母线接线等。

与中型屋外配电装置相比，半高型布置方式中母线高度增加不多，安装和运行检修还比较方便，占地面积减少较多，因此在 110 kV 和 220 kV 配电装置中得到应用。

在 110 kV 屋外配电装置中，半高型配电装置在占地、耗钢量和投资等方面都优于中型和高型屋外配电装置。而且由于母线隔离开关安装高度一般仅为 7~7.5 m，能够在地面上直接操作和观察合闸情况，可以不必专设上层操作巡视走道，故其结构简单，布置紧凑，常得到优先采用（见图）。半高型屋外配电装置常用尺寸见表。



110 kV 半高型屋外配电装置

半高型屋外配电装置常用尺寸 (m)

电压等级 (kV)	220		110	
	软母线	硬母线	软母线	硬母线
母线高度	15~20	13	12.5	10
母线相间距离	4	3	2.2	1.4
母线隔离开关高度	~10	~8	7.5	7

(代东方)

baohu jianxi

**保护间隙** (protective gap) 一种由一对电极及其间的空气间隙组成的过电压限制器。保护间隙的电极一般有环形、棒形和角形三种，使用时将保护间隙与被保护设备相并联，通常一个电极接高压，一个电极接地。当电极间距离很小（30 mm 及以下）时，为防止间隙被外物短路而误动，有时在接地引下线上还串联有辅助间隙。当受过电压作用时，保护间隙被击穿放电，将过电压波的能量导入大地，避免被保护设备因电压升高而击穿。

保护间隙具有陡峭的伏秒特性，不易与被保护设备的绝缘特性配合，而且由于空气间隙放电的分散性，放电电压也不太稳定。在保护间隙放电将过电压波能量导入大地的同时，电力系统中的工频短路电流（即工频续流）也将流过间隙。由于保护间隙一般没有熄灭工频续流电弧的能力，因此保护间隙的动作将在中性点有效接地系统中构成单相对地短路，此时必须由断路器分断电源，使电极间的电弧熄灭后才能恢复供电。保护间隙的放电还会使过电压波被截断，危及系统中变压器等电气设备绕组的纵绝缘。

尽管如此，由于保护间隙结构极为简单，价格低廉，仍然被用来保护输电线路上的弱绝缘和某些电气设备。在中等及弱雷电活动地区，保护间隙有较好的运行效果。欧洲的一些国家通常在线路进入变电所的门型塔绝缘子串上并联一对环状电极，构成保护间隙，作为进线段过电压保护措施的一部分。在中国，保护间隙主要用来保护线路上的弱绝缘点或电气设备。

(李启盛)

Beijing dianlan suidao gangcheng

**北京电缆隧道工程** (Beijing cable tunnel project) 北京市内电力网的 220 kV、110 kV 输电线路将以电力电缆线路为主，10 kV 电力电缆的数量也急剧增加。由于地下的煤气、通信、热力、上下水等市政管线密如蛛网，留给电力的通道有限，将电力电缆敷设在隧道中，已成为主要的敷设形式之一。

北京市的电缆隧道一般设在马路两侧，尽量与市政建设工程同步施工。沿着二环路已建成环形隧道 20km，市内已建隧道总长 103 km。主要施工方法为开挖式，局部地段采用掏挖或顶管方法。

隧道以 2 m×2 m 的方涵为主，与其他管线交叉处多为直径为 2 m 的混凝土圆管。早期的方涵为砖与混凝土混合结构。近年来，为延长使用寿命及提高防水性能，开始采用混凝土结构。

隧道内的典型布置：两壁装设电缆支架，支架钢材用镀锌或喷镀铝镁合金等方法进行防腐处理，支架间

的上下间距可以调节。220 kV、110 kV 电缆敷设在下层支架上,通信或低压电缆放在顶部支架上,其余支架可敷设 10 kV 电缆。尺寸较小的电缆接头可直接放在支架上,尺寸大的电缆接头放在专用的接头室内。隧道中央设人行步道,照明灯具装在隧道顶部,照明箱和动力箱装在侧壁,隧道低处设集水井并装有排水设施。

隧道防水一般外包三油(沥青)二毡,伸缩缝处用橡胶止水带。如有局部渗水,则用防水材料进行堵漏处理。

隧道的通风方式:在由防火墙(门)隔开的约500 m 一个区段内,二侧自然通风,中部机械抽风。

隧道电缆的防火措施为:①充油电缆可装设防火槽盒或埋沙;②外护层采用低烟、低毒、阻燃材料;③局部地段缠绕防火带或刷防火涂料;④接头和压力油箱上部挂 1211 灭火器;⑤隧道设防火隔墙,采用防火门;⑥充油电缆装设差压报警、事故断油防火装置。

北京市新建的方庄住宅区内,已建成一电缆隧道网,全长 3.49 km,为 2.2 m×2.2 m 钢筋混凝土结构,采用防水措施后无渗漏现象。全线共设接头小室 2 个,通风孔 6 个,人孔 23 个。人孔出口用双层盖板,下层盖板可以加锁以利隧道保卫。隧道全线均有 380 V 电源用于照明和动力,每 150 m 设一个电源箱,照明采用防潮吸顶灯装在顶板上,二灯间距为 15m。下层支架敷设二回 220 kV 充油电缆,品字形排列,放在防火槽盒中。靠下第二层支架敷设二回 110 kV 交联聚乙烯电缆,水平排列。110 kV 及 220 kV 电缆采用蛇形敷设,可有效防止电缆在热伸缩时产生的应力。220 kV 充油电缆的中间接头放在接头室中,接头上方悬挂 1211 灭火器。110 kV 交联聚乙烯电缆的中间接头尺寸不大,放在支架上。二排支架间的距离为 1 m。隧道内现已敷设 220 kV、110 kV 电缆各二回路及 10 kV 电缆 6 回路,尚留有 10 kV 电缆 12 回路走廊。方庄电缆隧道由北京供电设计院设计,北京市政二公司承担土建施工,北京供电局工程队敷设电缆及安装接头。工程于 1986 年 7 月开工,1988 年 7 月竣工,1989 年 10 月投运。

(王颂虞)

Beirelong fa

贝热龙法 (Bergeron's method) 见特性线法。

beikaopei zhiliu ouhe xitong

背靠背直流耦合系统 (back-to-back DC coupling system) 以交流-直流-交流两次换流的方式实现两个非同步运行的交流电力系统间的联

络而无直流输电线路的一种电力工程设施,也称非同步联络站。如果这两个交流系统的额定频率不相同,则称变频站。它们是将两套换流站设备装设在同一站内,一套运行于整流,另一套运行于逆变。两套换流站设备的直流侧经平波电抗器直接相连,交流侧分别连接到两个交流电力系统中的各一个节点,从而完成这两个交流系统间的耦合,可以实现相互之间的电力交换,以取得联网效益。

主要用途 可归纳为:①联络两个实际运行频率有差别的交流系统。正常运行时,充分利用两个交流系统最大负荷间的时差和季节差,以及水火核电、大中小型机组间的配合,进行调峰和调荷,以提高联网的经济效益和技术性能,同时也便于交流系统各自调频和调度管理。事故时,可通过直流耦合系统实现健全的交流系统对故障的交流系统的紧急支援;如果事故扩大将危及健全系统的安全运行时,又可通过耦合系统的控制,及时切断联络,以免停电范围进一步扩大。②在自然和行政地理分区的边缘地带,电力负荷与电力系统主要部分的联系往往较薄弱。如果不必要用电压等级较高的交流线路加以联网,而采用较低的电压等级又可能发生低频振荡。必要时,可利用非同步联络站来实现两个地理分区的电力系统联络,以提高这些边缘地带供电可靠性、灵活性和经济性。③用来连接某些水电站的变频水轮发电机组。在水电站的实际水位与正常水位差别较大的情况下,利用变频水轮机组,可不受或少受限制地运行于水能利用效率最高的转速和频率。特别是在高坝大水库蓄水的初期,水位较低时,即可利用必要下泄的生活、生产和航运用水提早发电。同理,用于抽水蓄能电站,除了可提高效率外,还可用于水泵的变频启动。④交流电力系统网架的某一段在发展过程中,如果设备和线路还允许增送电力,但会影响系统稳定时,可在这一段交流线路中插建非同步联络站,便可避免发生两端交流电力系统同步运行的稳定性问题。

特点 在背靠背直流耦合系统中,两个换流器间的直流侧连线很短,一般选用较低的直流电压,虽导致直流电流较大,连线截面和单位长度能耗均加大,但为数有限;与直流电压有关的设备绝缘费用却会明显降低。因此,一般非同步联络站的投资比同容量的换流站要低。此外,背靠背直流耦合系统在无功率调节方面,比远距离直流输电更为有利,因为无功调节中要降低直流电压,在远距离直流输电中将引起线路损耗的增加,背靠背直流耦合系统中则不存在此问题。

接线方式 背靠背直流耦合系统的主接线有并联型和串联型两种。①并联型。如图 1 所示,将连接到两侧交流系统的换流器成对接成直流耦合系统,然后对

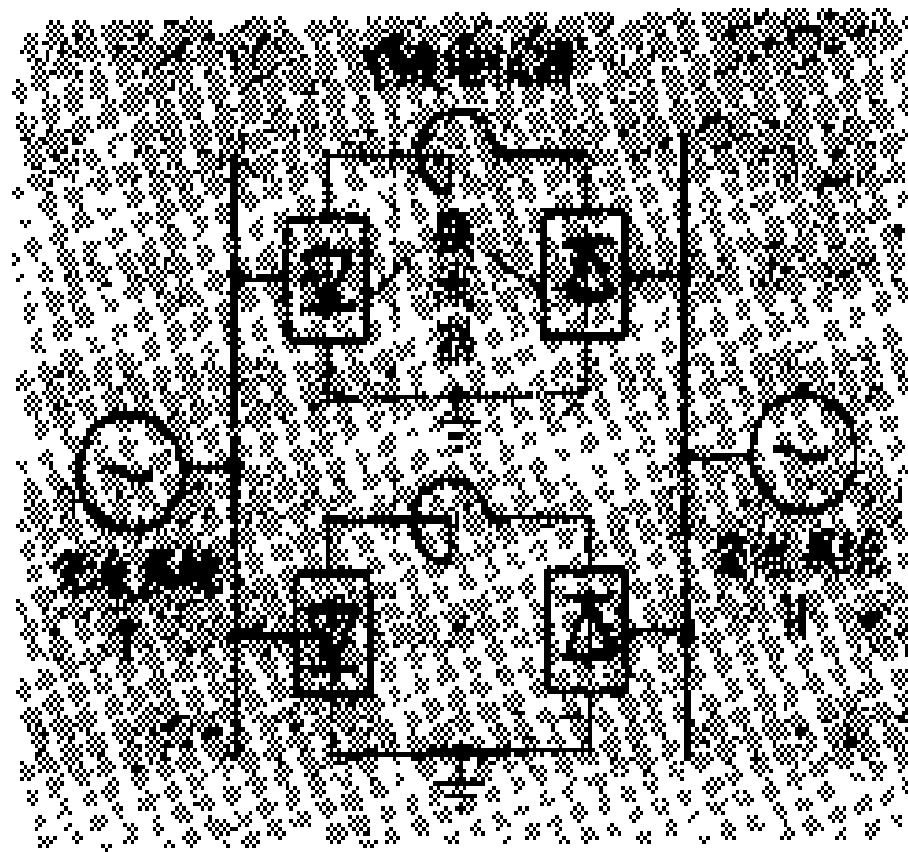


图1 并联型背靠背直流耦合系统

与对之间再并联。其特点是各对可分别投入或退出并联运行。当某一对故障时，可方便地将其退出运行而不致影响整个耦合系统的继续运行。但每对直流耦合系统均需配置平波电抗器。

②串联型。如图2所示，分别连接到两端交流系统的换流器交叉串联构成耦合系统。采用这种接线方式，整个耦合系统仅需一台平波电抗器，但当其中某一换流器发生故障，就会影响整个耦合系统的正常运行，为此需增设隔离开关，必要时可将故障换流器从系统中退出，以保证健全换流器构成的直流耦合系统继续运行。

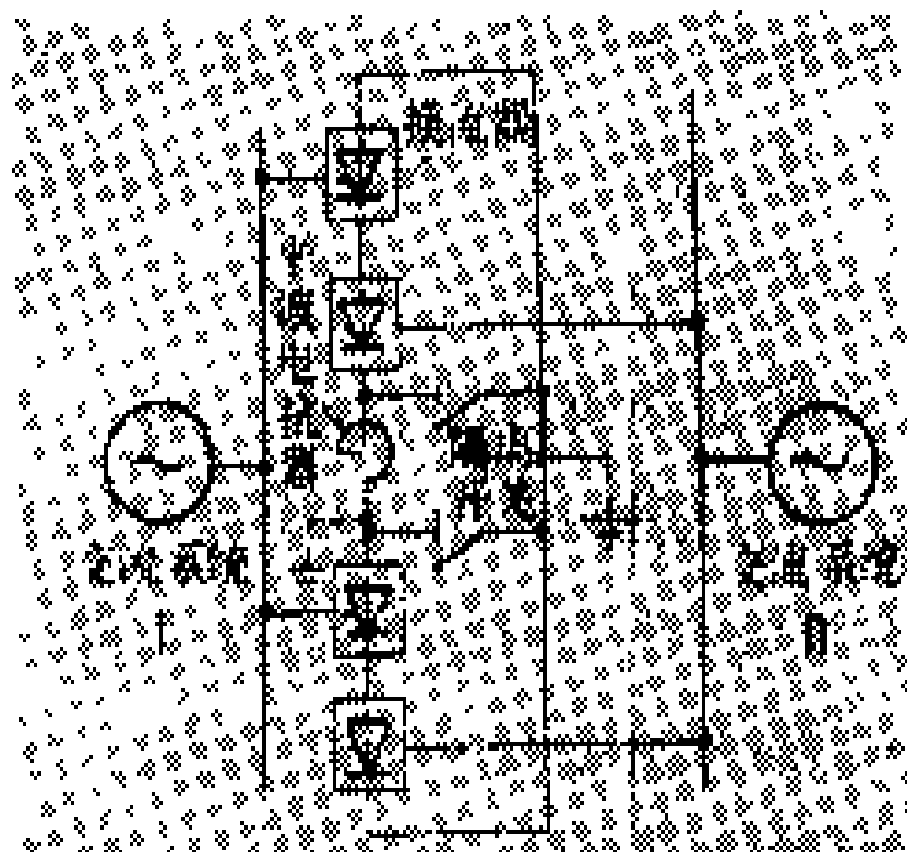


图2 串联型背靠背直流耦合系统

参考书目

戴熙杰主编，直流输电基础，北京：水利电力出版社，1990

(王继桦)

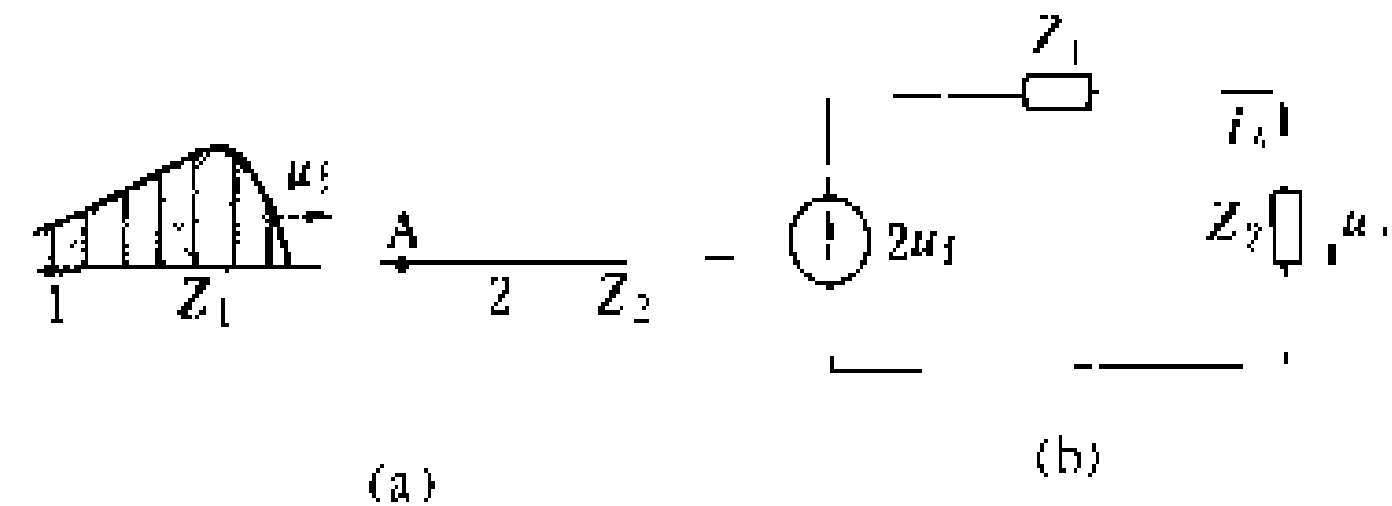
Bidexun fazhe

**彼德逊法则** (Petersen's principle) 行波计算中的等值电源定理，也称等值集中参数定理。常用于过电压计算。按彼德逊法则，在行波作用下，图(a)分布参数电路中结点A的电压(沿 $Z_2$ 前行的折射电压) $u_A$ 和电流 $i_A$ 可用图(b)的等值集中参数电路求得，即有

$$u_A = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u_i \tag{1}$$

$$i_A = \frac{2}{Z_1 + Z_2} u_i \tag{2}$$

式中 $Z_1$ 为导线1的波阻抗； $Z_2$ 为导线2的波阻抗；



用集中参数电路等值取代分布参数电路  
(a) 分布参数电路；(b) 集中参数电路

$u_i$  为沿导线传向结点A的电压波。

当线路为有限长时，为计算多次折射与反射，可多次应用彼德逊法则(见网格法)。如果结点A接有其它集中参数元件，在应用彼德逊法则时该集中参数元件可保持不变。

(陈慈萱)

bileiqi

**避雷器** (lightning arrester; surge arrester)

一种能释放过电压能量限制过电压幅值的保护设备。使用时将避雷器安装在被保护设备附近，与被保护设备并联。在正常情况下避雷器不导通(最多只流过微安级的泄漏电流)。当作用在避雷器上的电压达到避雷器的动作电压时，避雷器导通，通过大电流，释放过电压能量，并将过电压限制在一定水平，以保护设备的绝缘。在释放过电压能量后，避雷器会自动恢复到不导通的正常工作状态。

避雷器分为阀式避雷器和管式避雷器两大类。阀式避雷器又分有间隙和无间隙两种。有间隙阀式避雷器的基本元件是火花间隙和以碳化硅或氧化锌为主要原料的非线性工作电阻片(简称阀片)。这些元件串联叠装在密封的瓷套或其他绝缘材料的套筒内。无间隙阀式避雷器的基本元件则只有阀片，它的材料主要是氧化锌和其他金属氧化物，故通称金属氧化物避雷器或氧化锌避雷器。管式避雷器又称排气式避雷器，主要包括外隔离间隙和灭弧间隙两部分，灭弧间隙装在由产气材料制成的灭弧管内，与外隔离间隙相串联。阀式避雷器主要用来保护发、变电设备的绝缘。管式避雷器主要用来保护发电厂、变电所的进线段和线路上的绝缘弱点。

避雷器的保护特性是输配电设备绝缘配合的基础之一。性能优越的避雷器能将电力系统中的过电压限制到对绝缘无害的水平。改善避雷器的保护性能，不仅可以提高输配电系统的运行可靠性，而且可以降低电气设备绝缘水平，从而减轻设备重量，降低设备造价。

阀式避雷器的保护性能比管式避雷器好。在阀式避雷器中，氧化锌避雷器在电气性能、耐受污秽以及结构等方面均具有优越性，在实际应用中已逐步取代碳化硅避雷器。

(李启盛)

bileiqi shiyan

**避雷器试验** (surge arrester tests)

为保证避雷器的质量，按照规定的技术条件对避雷器的性能进行测试。避雷器在生产厂中进行的试验有例行试验、抽样试验、定期试验和型式试验，在使用现场进行



的试验有交货时的验收试验、安装后的交接试验和运行期间的预防性试验。

**例行试验** 每只避雷器(或电阻片)均须承受的试验。交流无间隙金属氧化物避雷器的例行试验项目有:持续电流试验、标称放电电流的残压试验、工频参考电压试验、直流参考电压试验、密封性能试验、局部放电试验等。有间隙的阀式避雷器还要进行工频放电电压试验。管式避雷器只需进行工频放电试验或工频耐压试验。

**抽样试验** 阀式避雷器的抽样试验主要对电阻片进行,在—批电阻片中抽取两个(约占总数的1.5%)进行方波电流冲击试验和大电流耐受试验。对有间隙的阀式避雷器,还需对产品的冲击放电电压进行抽样试验。对无间隙的金属氧化物避雷器,每半年要对电阻片进行一次加速老化的抽样试验。管式避雷器只对其冲击放电电压进行抽样试验。

**定期试验** 目的是监视长期生产中产品质量的稳定性。定期试验—般3年进行—次。长期停产后恢复生产时必须做定期试验。如对金属氧化物避雷器,要求从正常生产的产品中抽取3只进行残压试验、长持续时间电流耐受试验、动作负载试验和工频耐受时间特性试验。管式避雷器没有定期试验项目。

**型式试验** 对产品性能和结构设计进行全面鉴定的试验。对阀式避雷器和金属氧化物避雷器,除出厂试验、抽样试验、定期试验的试验项目外,还要进行压力释放试验、瓷套绝缘耐受试验、机械负荷试验、人工污秽试验、多柱避雷器电流分布试验等。管式避雷器则还要进行冲击通流能力试验和切断能力试验等。

参考书目

机械工程手册 电机工程手册编辑委员会,电机工程手册,第28篇 避雷器,北京:机械工业出版社,1978

(李启盛)

bileixian

**避雷线** (ground wire) 架设在被保护物上方水平方向的接地导体,又称架空地线。它可将雷云对地的放电引向自身并泄入大地,使被保护物免遭直接雷击,是架空输电线路最常用的防雷设施。其主要作用是防止雷击架空导线,并在架空导线受到雷击时起分流、耦合和屏蔽作用,使线路绝缘所承受的过电压降低。避雷线也可用来保护屋外配电装置和其它工业与民用的构筑物与建筑物。由于其保护范围可沿被保护物的顶部结构延伸,易于实现大面积的遮蔽,且外观紧凑整齐,所以国际上用避雷线(或避雷带)代替避雷针的做法已相当普遍。

**保护范围** 用避雷线保护屋外配电装置和建筑物的保护范围的计算方法,中国和苏联的规定基本相同。图1为单根避雷线的保护范围示意图,可写成如下公式

$$\begin{aligned} \text{当 } h_x \geq \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x &= 0.47(h - h_x)P \\ \text{当 } h_x < \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x &= (h - 1.53h_x)P \end{aligned}$$

式中  $h$  为避雷线高度, m;  $r_x$  为  $h_x$  水平面每侧保护范围的宽度和端部的保护半径, m;  $P$  是在避雷线比较高时保护范围不与避雷线高成正比增大的系数。当  $h \leq 30$  m 时,  $P=1$ ; 当  $30 < h \leq 120$  m 时,  $P=5.5/\sqrt{h}$ 。图2为两根等高平行避雷线的

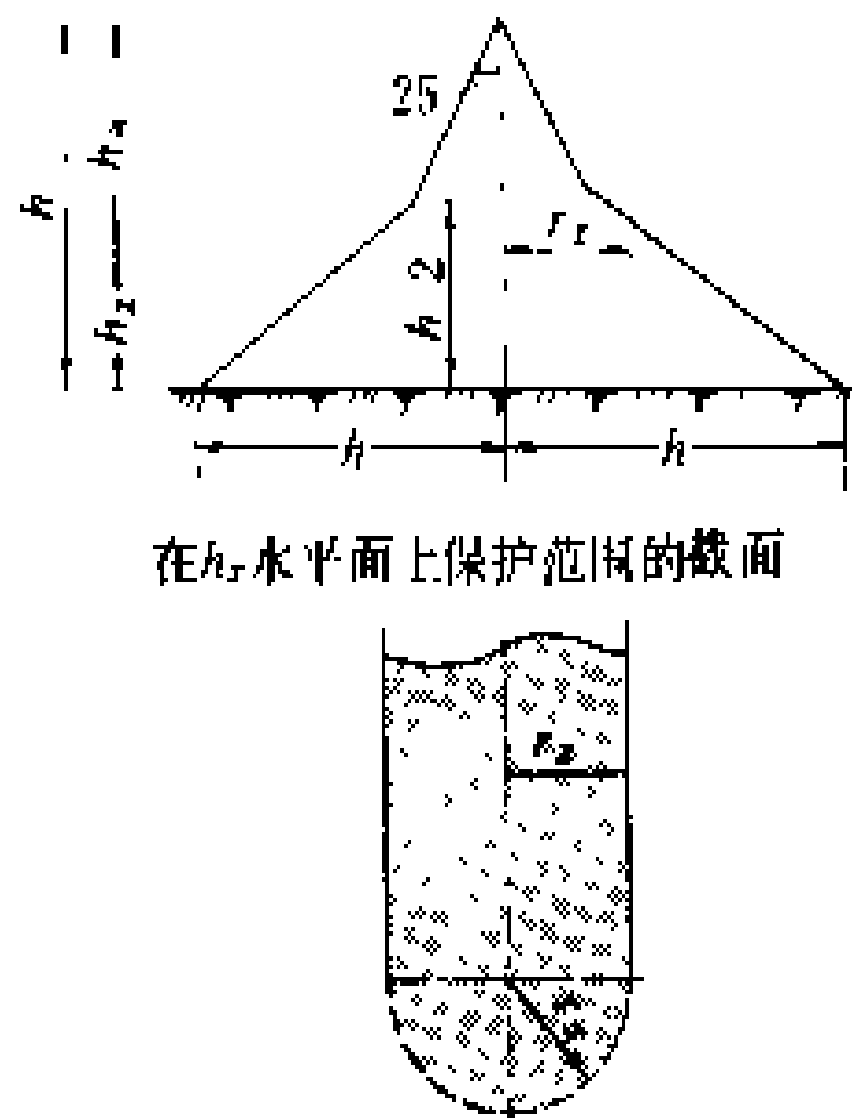


图1 单根避雷线的保护范围

保护范围示意图。两线外侧的保护宽度按单根避雷线的计算方法确定。两线内侧保护范围的横截面,由通过两线1、2点及保护范围上部边缘最低点(O点)的圆弧确定。O点的高度  $h_0 = h - \frac{D}{4P}$ , 式中  $h$  为避雷线高度, m;  $D$  为两线间的距离, m。中国的国家标准还规定了两根以上等高和不等高避雷线的保护范围以及避雷线和避雷针联合保护范围的计算方法。

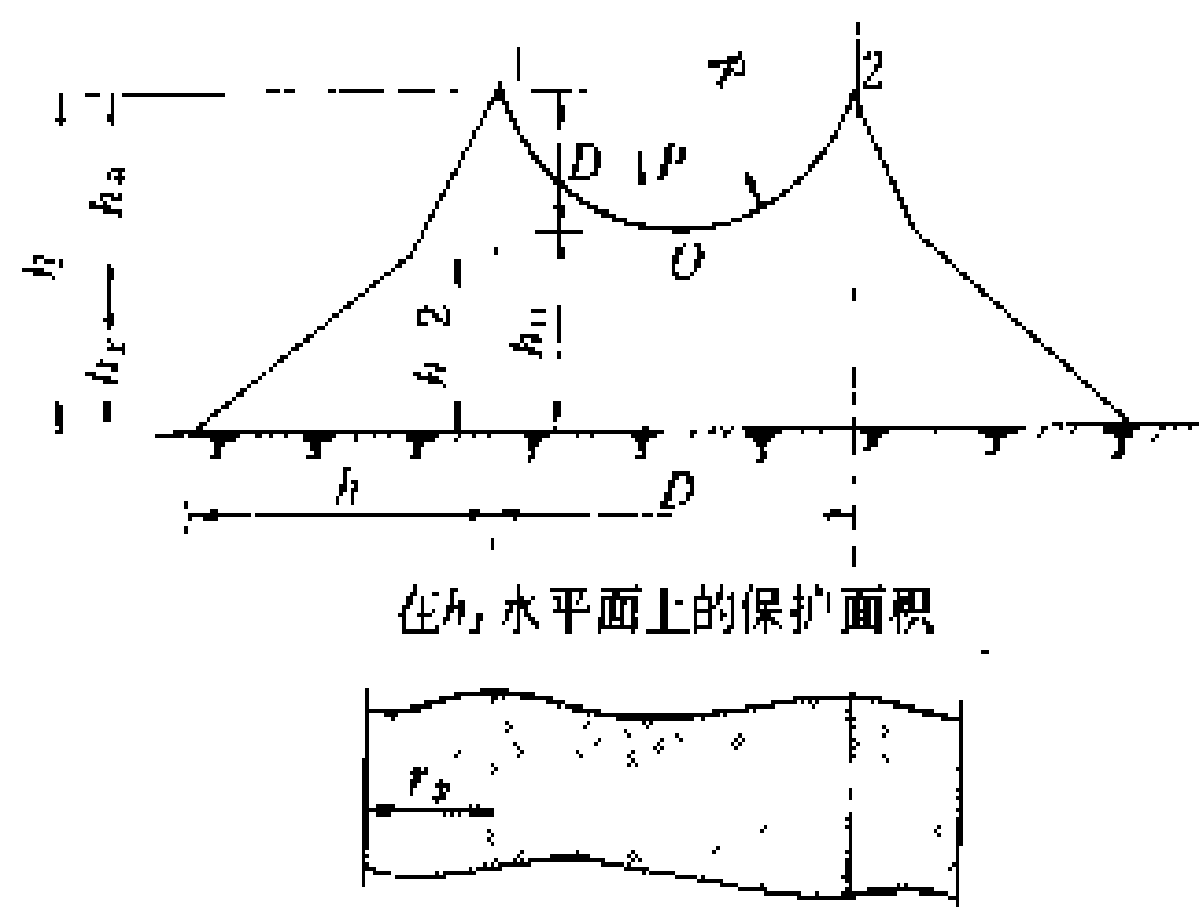


图2 两根平行避雷线的保护范围

**绕击率** 雷电绕过避雷线直击于输电线路导线,称为绕击。绕击的次数与线路雷击总次数之比称为绕击率。绕击率与避雷线对边线的保护角、杆塔高度以及线路通过地区的地形、地貌、地质条件有关。国际上各研究者根据实验室模拟试验和运行统计资料提出的绕击率计算公式和数据,相互间差别很大。中国国家标准根据多年的运行统计和实测数据求得的架空输电线路绕击率计算公式为

$$\lg P_s = \frac{\alpha \sqrt{h_t}}{86} - 3.9 \text{ (对平地线路)}$$

$$\lg P_s = \frac{\alpha \sqrt{h_t}}{86} - 3.35 \text{ (对山区线路)}$$

式中  $P_s$  为绕击率;  $h_t$  为杆塔高度, m;  $\alpha$  为避雷线对边导线的保护角, 单位为度。两根避雷线时, 只要其间的距离不超过避雷线与中间导线高差的 5 倍, 中间导线的绕击率便可忽略不计。

**绕击电气几何模型** 用以分析避雷线屏蔽作用和绕击机理的几何图形, 如图 3 所示。在雷云对地放电的先导头部发展到离地面一定距离时, 会对地面上某一点发生闪击的距离称为击距。击距与雷电流幅值有关。美国人 E. R. 怀特黑德 (E. R. Whitehead) 和 G. W. 布朗 (G. W. Brown) 在计算中采用以下公式

$$r_s = 7.1 I^{0.75}$$

式中  $r_s$  为击距, m;  $I$  为雷云主放电电流, kA。输电线路发生绕击时的击距, 还与避雷线和导线的高度以及保护角的大小有关。图 3 是怀特黑德提出的绕击电气

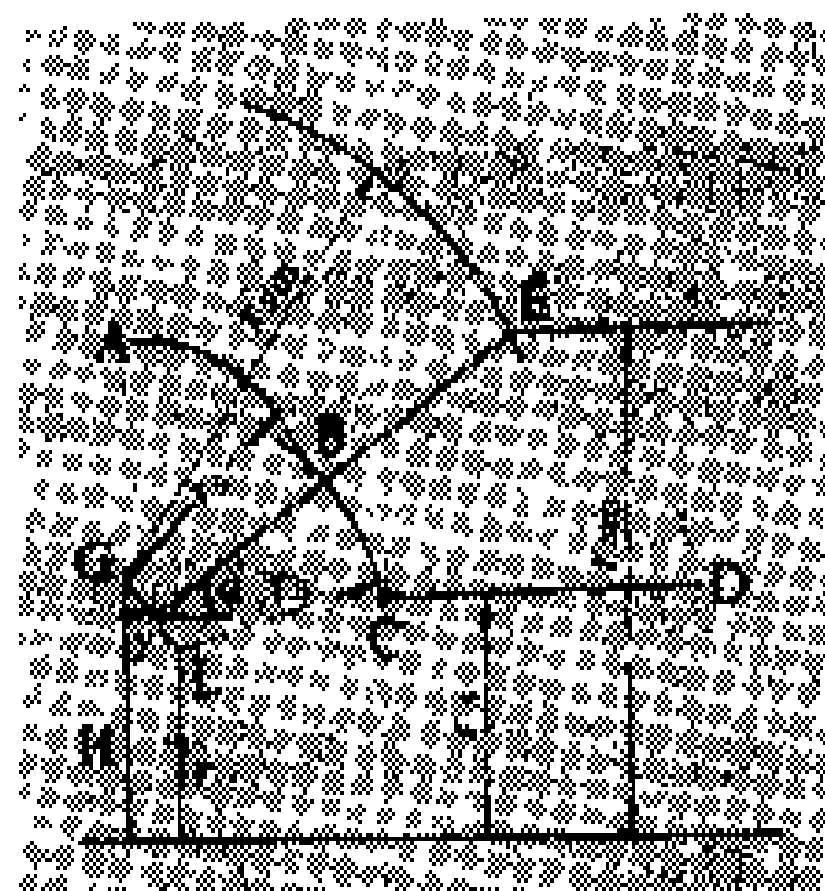


图 3 绕击电气几何模型

几何模型。当  $r_s$  确定后, 就可求出先导对导线的绕击情况。分别以避雷线 G 和导线 L 为圆心, 以击距  $r_s$  为半径作两个圆弧, 两弧交于 B 点。再在高出地面  $r_s$  处作一水平线与以 L 为圆心的弧交于 C 点。

由圆弧  $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{BC}$  和直线 CD 在沿线路方向形成一个曲面, 称之为定位曲面。在雷电流为  $I$  的先导未到达定位曲面之前, 其发展不受地面物体的影响。若先导落在  $\widehat{AB}$  上, 则雷击避雷线, 若落在  $\widehat{BC}$  上, 则导线受到绕击; 若落在 CD 平面上, 则雷击地面。因此  $\widehat{BC}$  曲面称为绕击暴露面。随着雷电流的增大,  $\widehat{BC}$  段逐渐缩小。当雷电流增大到  $I_m$  值时,  $\widehat{BC}$  缩小为零, 即不会发生绕击。对应于  $I_m$  的击距  $r_{sm}$  为临界击距。如输电线路的避雷线高度  $H$ 、导线高度  $Y$  和保护角  $\alpha$  已定, 便可求出相应的  $r_{sm}$  及  $I_m$ 。按照雷电流的概率分布, 小于  $I_m$  的雷电流总有一定的比例, 所以线路会有一定的绕击率。但若线路的绕击耐雷水平不小于  $I_m$ , 即使线路受到绕击也不会发生闪络事故, 此时称为有效屏蔽。击距法是在 20 世纪 60 年代提出的, 它对于认识输电线路高杆塔和山区线路的绕击现象, 比在这以前主要按保护角的计算方法有所改进, 但仍有一定局限性。例如按击距法设计输电线路, 特别是大跨越线路, 往往出现与运行经验相悖的结果。因此击距法至今还难于在工程中实用。

**绝缘避雷线** 将避雷线绝缘起来主要是为了降低线路的附加电能损失和利用避雷线开设通信通道。此外, 若要从避雷线上抽取微量电能或考虑在避雷线覆冰时要进行溶冰, 也都需要将避雷线绝缘起来。绝缘避雷线还便于测量杆塔接地电阻。目前, 在超高压长距离输电线路上采用绝缘避雷线的做法较为普遍。避雷线绝缘通常是用一只具有并联保护间隙的无裙支持绝缘子将避雷线与接地金属部件隔开。并联间隙的电气强度既要求在线路正常运行条件下具有良好的绝缘性能, 又要求在雷击时避雷线能完全呈接地状态, 不影响其防雷功能。一般的避雷线多采用钢绞线, 为了降低用避雷线作通信通道时的信号传输衰耗, 有时绝缘避雷线也改用铝包钢线或铝合金线。

参考书目

- 解广润主编. 电力系统过电压. 北京: 水利电力出版社, 1991  
刘继. 电气装置的过电压保护. 北京: 水利电力出版社, 1986

(张大琨)

bileizhen

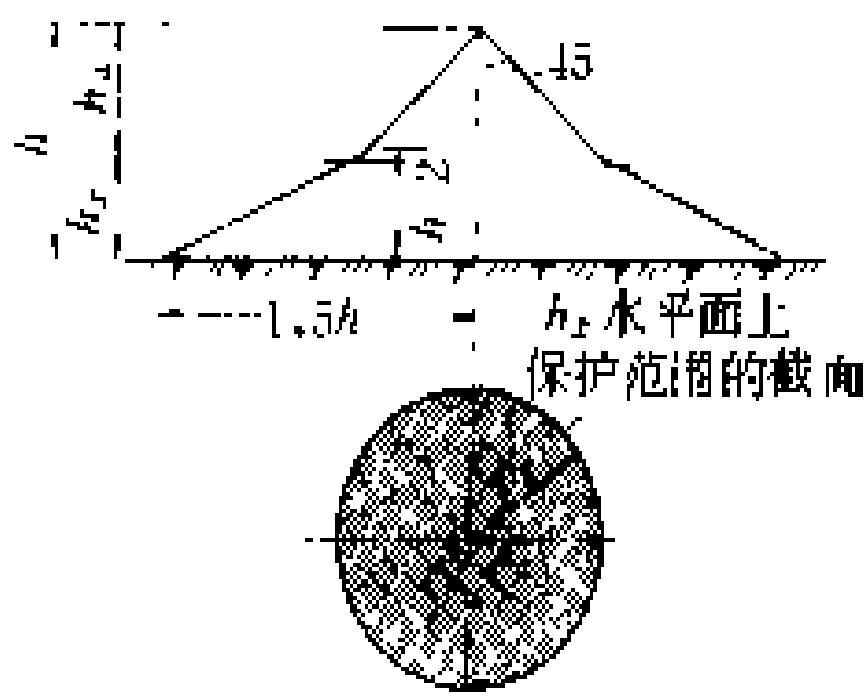
**避雷针** (lightning rod) 将雷电引向自身并泄入大地使被保护物免遭直接雷击的针形防雷装置。避雷针实际上是一组引雷导体, 由接闪器、接地引下线和接地体三部分组成。接闪器用圆钢或钢管制成, 固定于被保护物体或邻近支持物上, 经接地引下线与埋设在地下或水下的接地体连接。接闪器一定要高于被保护物。当被保护物附近上空雷云的先导发展到距地面或被保物体一定高度时, 由于避雷针高出地面和被保护物体, 而且又有良好的接地, 便影响雷云电场发生畸变, 引导雷云先导向其自身发展, 在绝大多数情况下使雷击于避雷针而不击于被保护物体。

避雷针常被用作建筑物、电气设施和易燃易爆物品存放场所等的直击雷保护装置。发电厂和变电所的屋外配电装置, 烟囱、冷却塔和输煤系统的高建筑物, 油、气等易燃材料的存放设施以及微波天线等, 一般也用避雷针来进行保护。

避雷针受到雷击向大地泄放雷电流时, 沿避雷针会出现高电位。这种高电位对于砖石或混凝土结构一般不会造成危害。所以像烟囱和冷水塔等的避雷针接闪器可固定在它们的顶部。但这种高电位对于易燃易爆物品和电气电子设备便有可能因出现火花或发生反击而造成起火爆炸或设备损坏事故, 通常要采取降低接地电阻或设置独立避雷针等措施来消除这种危险。(见变电所防雷)

避雷针的保护范围是一个闭合的锥体空间, 接闪

器的上端是锥体的顶点，保护半径是针高及雷电绕击概率的函数。20 世纪 60 年代以来，国际上出现一种计算避雷针和避雷线保护范围的新概念，提出保护范围与雷击的放电距离有关，而雷击放电距离是雷电流的函数。雷电流大时，雷电绕过避雷针击于被保护物体的概率降低。有的国家已将这一概念应用于防雷法规中的避雷针保护范围计算方法。



中国国家标准规定的电力设施避雷针保护范围，是按实验室试验结果和运行统计资料确定的。试验中取绕击率为 0.1%，试验时没有考虑雷电流幅值对屏蔽作用的影响。图示为单支避雷针的保护范围。高度为  $h$  的避雷针，其地面的保护半径为  $1.5h$ ，在被保护物体高度为  $h_x$  的水平面上的保护半径为

$$\begin{aligned} \text{当 } h_x \geq \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x &= (h - h_x) P = h_x P \\ \text{当 } h_x < \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x &= (1.5h - 2h_x) P \end{aligned}$$

式中  $P$  为避雷针太高时保护半径  $r_x$  不与针高成正比增大的系数。当  $h \leq 30\text{m}$  时， $P=1$ ；当  $30 < h \leq 120\text{m}$  时， $P=5.5/\sqrt{h}$ 。

采用两支及以上避雷针时，其联合保护范围比单支避雷针保护范围之和要大。

避雷针是美国人 B. 富兰克林 (B. Franklin) 在 18 世纪 50 年代发明的。200 多年来，国际上对避雷针是具有屏蔽作用的引雷针早已取得共同的认识，许多国家也都据此制定出工程设计用保护范围计算方法标准。但不同研究者所提出的保护范围计算方法差别很大，迄今没有一种为各国所公认的完善的计算方法。

参考书目

戈尔德著，雷电 下卷，李文恩等译，北京：水利电力出版社，1983

(张大琨)

变电金具

(substation fittings) 发电厂和变电所的配电装置中用于悬挂、固定、连接和支持母线以及母线与电气装置相连接用的金属附件的统称。其中供悬挂绝缘子串及相应的连接金具与架空输电线路使用的架空输电线路金具完全相同。参见彩图插页第 7 页 26 图。

变电金具按其不同用途主要可分为 T 接金具、设

备金具及固定金具三大类。按其结构不同又可分为螺栓型（可卸型）、压缩型（不可卸型）和混合型（二者兼有）三种。

螺栓型金具的接触面平整而粗糙，以增加接触点。接触面上涂以中性凡士林或导电复合脂，防止接触面氧化，导电复合脂含导电金属粉末（如锌粉），能改善导电性能。此外用力矩板来紧固螺栓，以保证适当的紧固度。

**T 接金具** 配电装置中用于连接母线与引下线的金具。

螺栓型 T 接线夹 又称可卸型夹板式 T 接线夹，由与导线相同材质的或强度高于导线的材料制成。夹板上有线槽，借助紧固螺栓产生的压力使导线与 T 接线夹成为可靠的导电体（见图 1）。有些国家则将线槽板做成锯齿形来改善电气接触面。

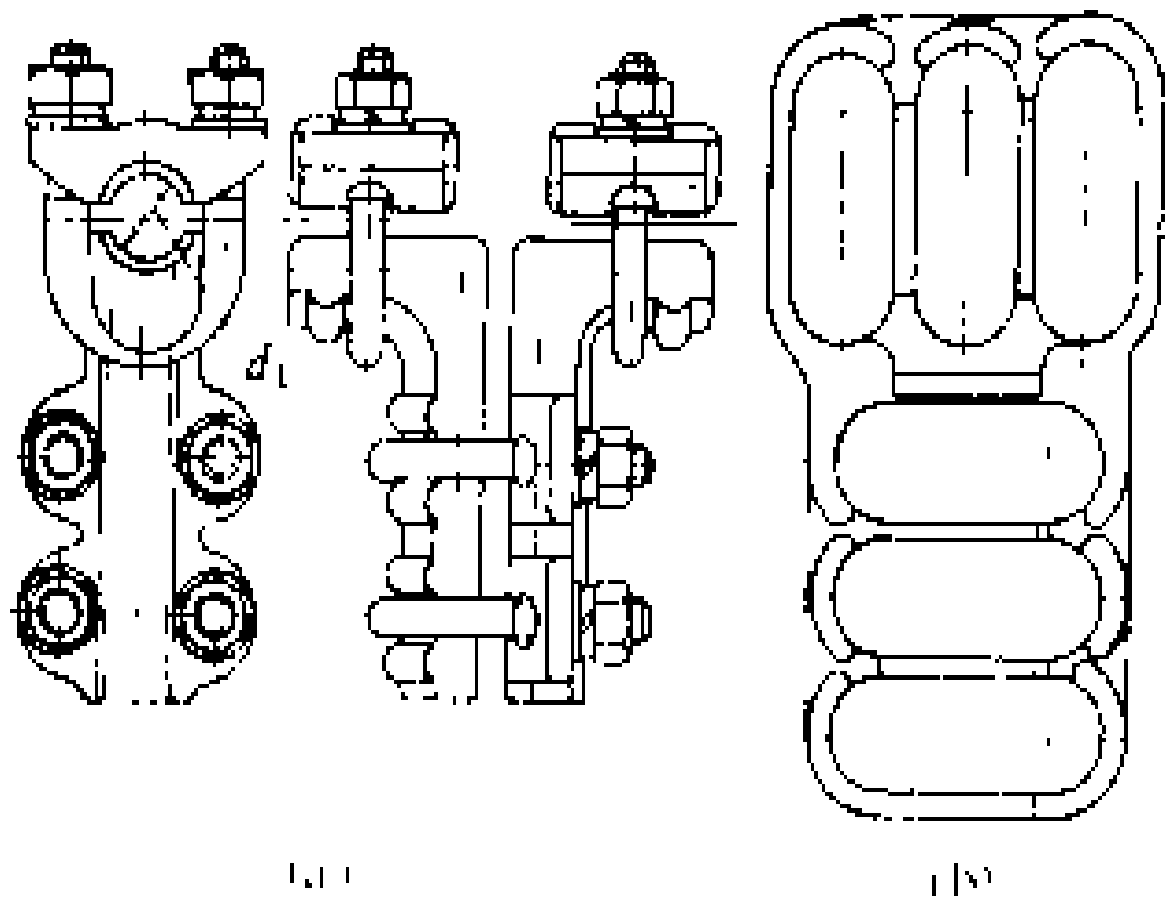


图 1 螺栓型 T 接线夹  
(a) 普通型；(b) 防电晕型

压缩型 T 接线夹 又称不可卸型圆形管体 T 接线夹。借助钢模用液压法将圆形管体压缩成正六角形，也有采用爆炸压接的方法，使导线压紧于圆管中。变电所压缩型 T 接线夹

多数设计成抽匣式，母线架好后无需断开即可在下方设立操作平台，或在液压操作车上进行液压操作，或直接进行爆压。

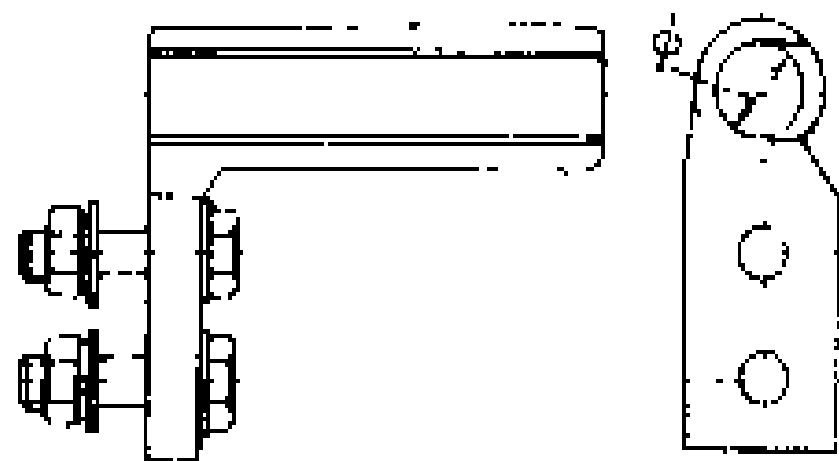


图 2 压缩型 T 接线夹

匣式 T 接线夹下端附有接线端子板，供连接不同截面的引下线，装卸灵活方便（见图 2）。

混合型 T 接线夹 一端螺栓连接另一端压缩连接的 T 接线夹。与母线固定采用螺栓连接，具有可卸和便于高空作业等优点，引下线压接可在地面上进行（见图 3）。

**设备金具** 电气设备之间及其与母线引下线的连接金具。按其结构不同分为螺栓型设备线夹（见图 4）和压缩型设备线夹（见图 5）两类。此外，还有与铝质设备线夹配套的铜铝过渡接触板。容量较大的变电所

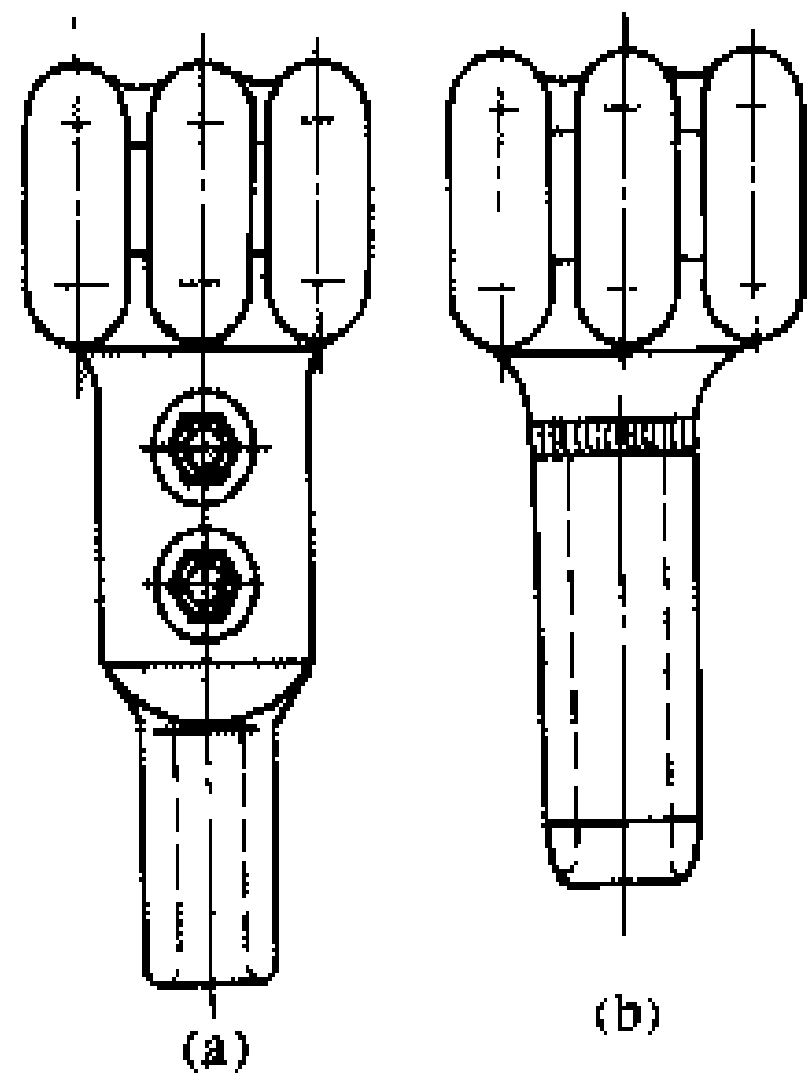


图3 混合性T接线夹  
(a) 引下线可拆卸; (b) 引下线不可拆卸

采用分裂导线时, 选用双分裂导线设备线夹 (见图6) 和三分裂导线设备线夹 (见图7)。

设备线夹有 $0^\circ$ 、 $30^\circ$  ( $45^\circ$ ) 和 $90^\circ$ 等多种 (见图8), 以满足连接导线与电气设备接线板不同出线角度配合的需要, 避免设备端子受到弯曲应力。导线截面很小时, 可用 $0^\circ$ 设备线夹, 而将线夹出口处的导线弯成需要的角度。

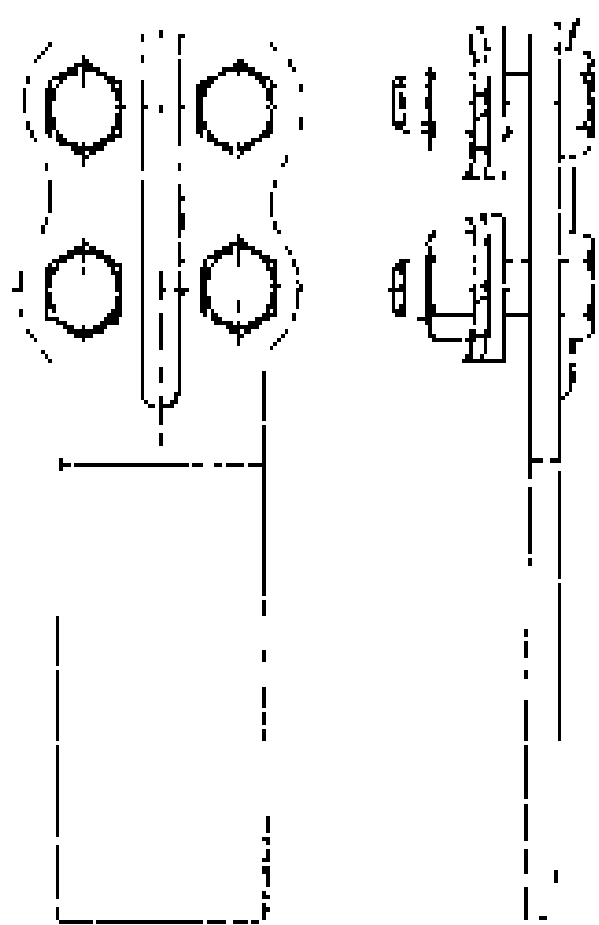


图4 螺栓型设备线夹

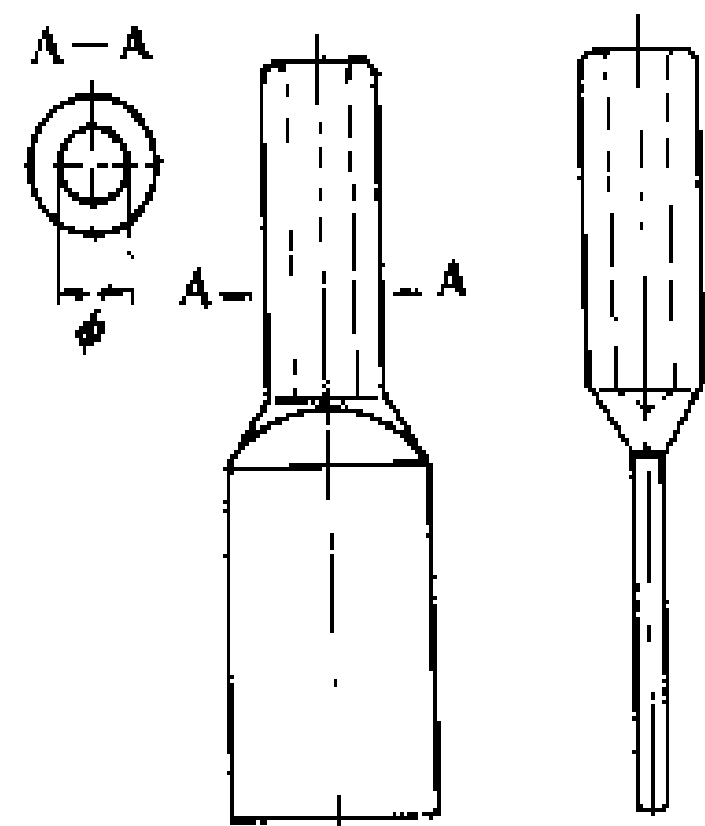


图5 压缩型设备线夹

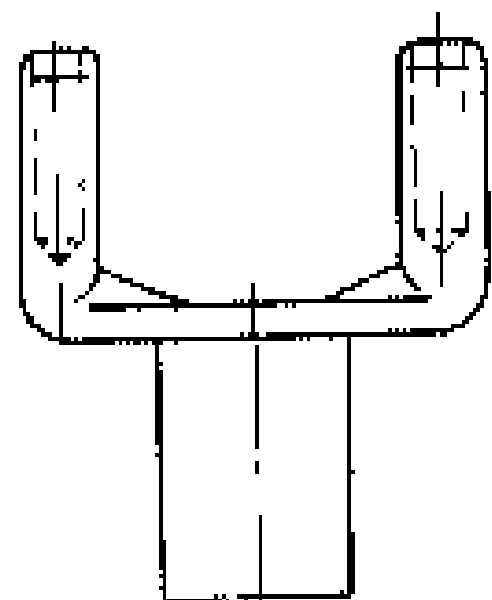


图6 双分裂导线设备线夹(压缩型)



图7 三分裂导线设备线夹(压缩型)

螺栓型设备线夹 由带线槽的接线板和端子板组成的设备线夹, 借助螺栓将导线紧固在线槽内 (见图4)。大截面导线的设备线夹设计成流线性, 无棱角, 螺栓部位加防晕装置, 以消除电晕影响 (见图9)。

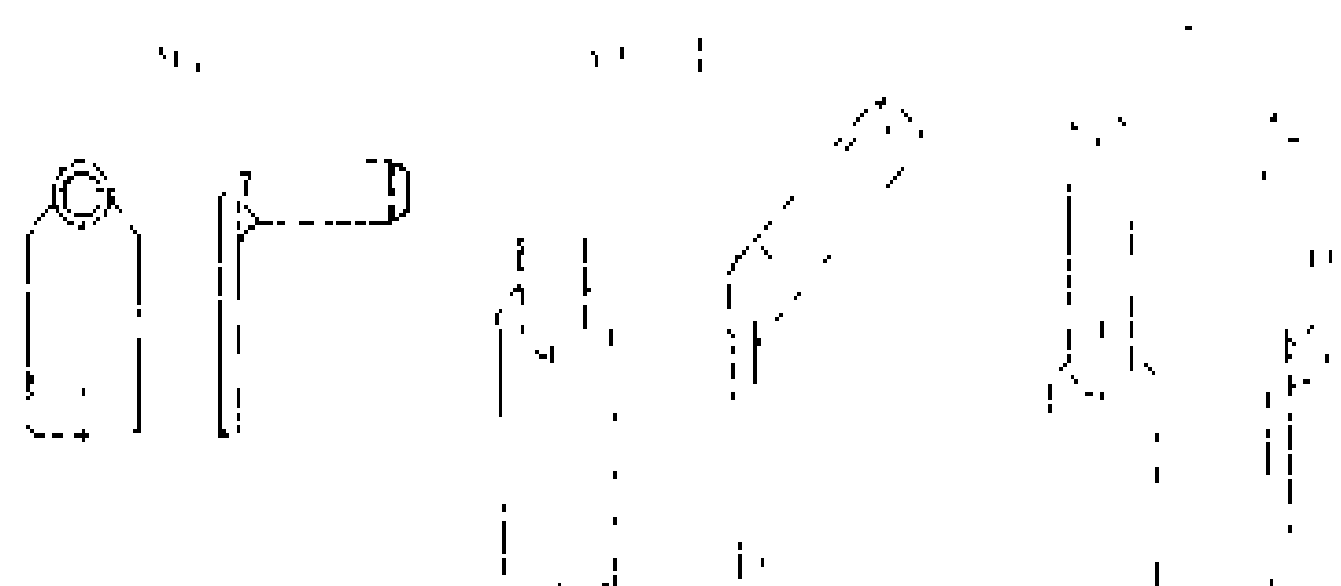


图8  $0^\circ$ 、 $30^\circ$  ( $45^\circ$ )、 $90^\circ$ 设备线夹 (压缩型)  
(a)  $90^\circ$ ; (b)  $30^\circ$  ( $45^\circ$ ); (c)  $0^\circ$

压缩型设备线夹 由圆形管体和端子板组成的设备线夹, 借助钢模用液压法将圆形管体压缩成正六角形、嘴形、扁六角形和凹形, 导线压紧于管体中。也有采用爆压的方法。大多压缩成正六角形, 小截面导线以薄壁圆形管体局部压缩成凹形。过去曾采用过将椭圆形管体压缩成圆形的工艺, 但由于压缩比太大, 现已很少采用 (见图10)。

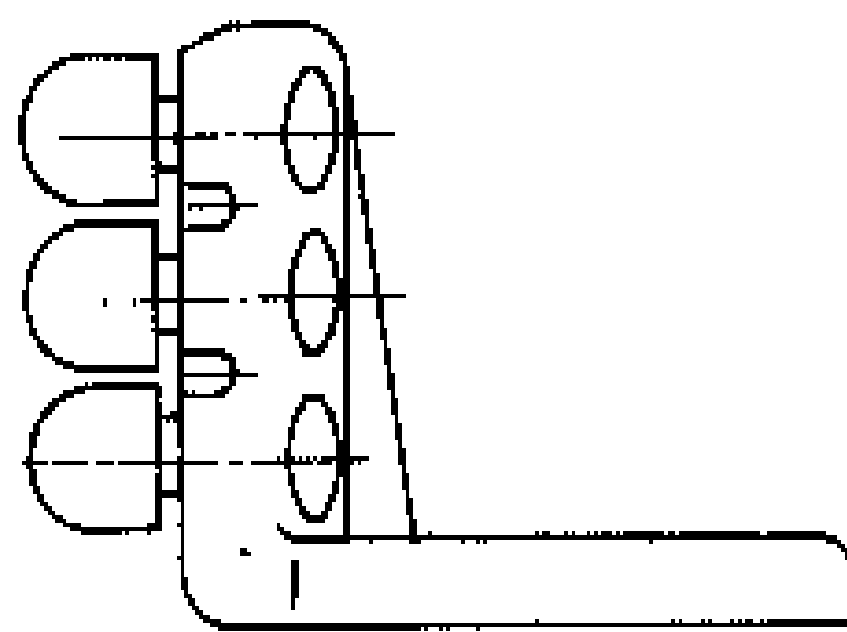


图9 防电晕螺栓型设备线夹

图10 压缩型设备线夹的压缩成形

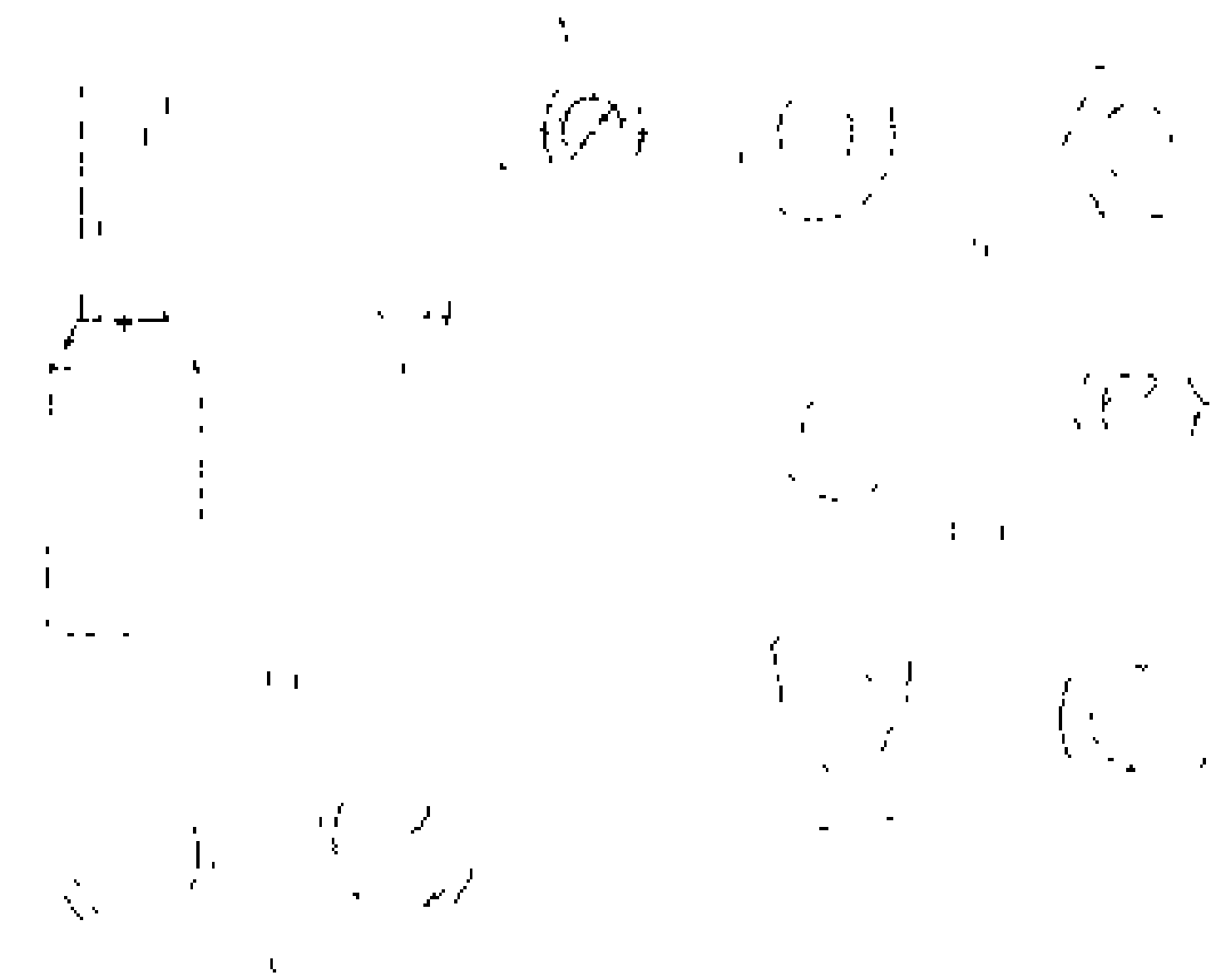


图10 压缩型设备线夹的压缩成形  
(a) 压缩型设备线夹; (b) 圆管压成正六角形; (c) 圆管压成嘴形; (d) 圆管压成凹形; (e) 椭圆形压成圆形

铜铝过渡接触板 大电流电气设备的接线板均采用

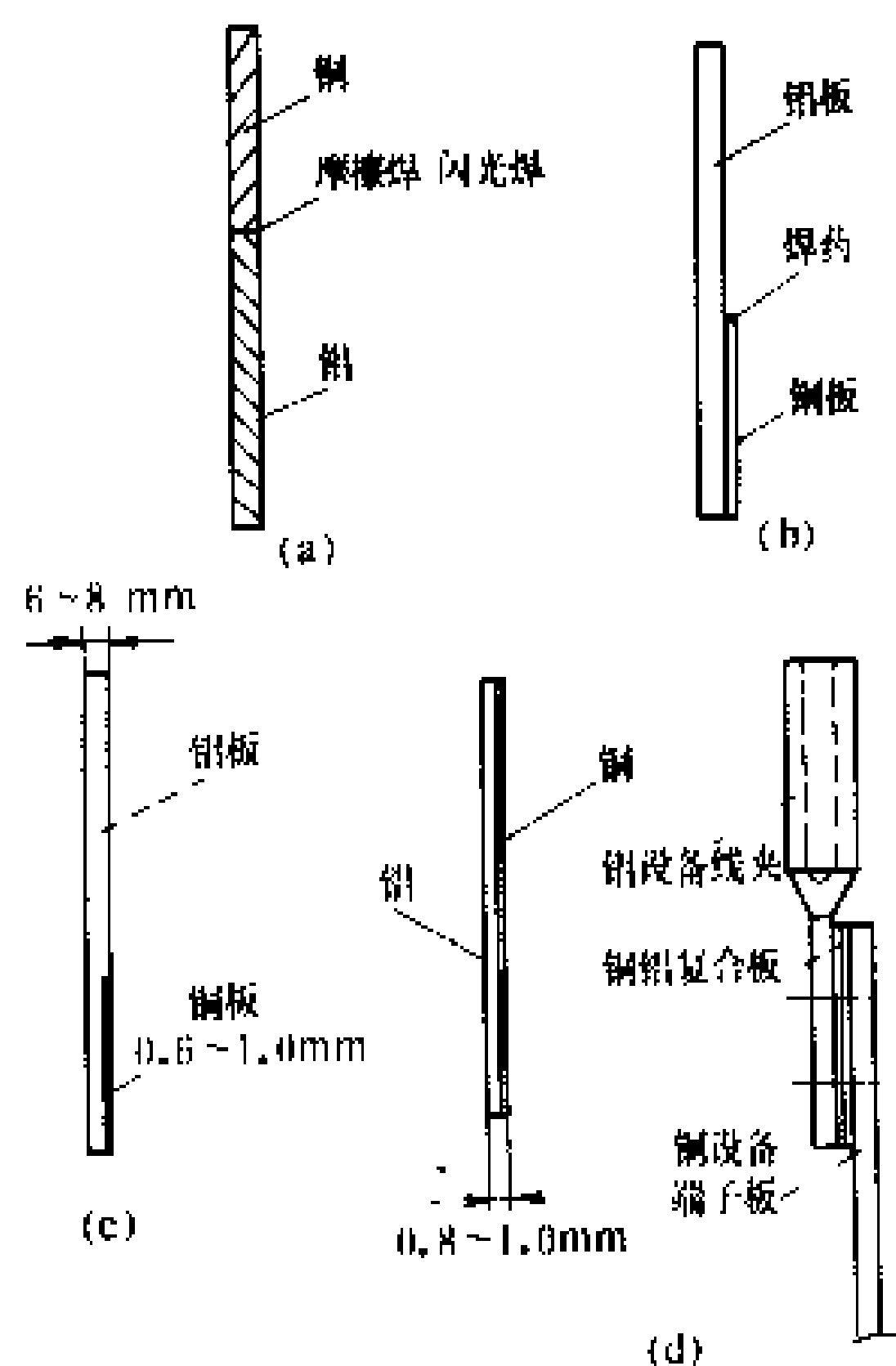


图11 设备线夹的铜铝过渡接触板  
(a) 摩擦焊、闪光焊; (b) 钎焊 (铝上焊铜); (c) 铝上复铜; (d) 铜铝复合板

用铜质，而引下线和连接导线则大多采用钢芯铝绞线和铝质设备线夹。为解决铜和铝不同金属接触面的电化学腐蚀问题，增设了铜铝过渡接触板。是将铜和铝通过摩擦焊、闪光焊、钎焊或复铜冷压焊工艺（见图 11）制成为一个整体，可以附着在铝质设备线夹上，也可以是单独的铜铝复合板 [见图 11 (d)]。如为中小截面的圆形棒，则通常用摩擦焊机焊成一体后，再根据设备线夹结构将其压成板状；矩形板件则用闪光焊接直接对焊，也有的是用低熔焊药将铜板钎焊在铝板上。

**固定金具** 用于支撑绝缘子上导线的固定，分裂导线的间隔、导线的支撑及补偿等的金属附件统称为固定金具。

**母线固定线夹** 硬母线固定线夹分为矩形、槽形、菱形和管形四大类。矩形母线固定线夹又按其不同布置方式分为立放和平放两种（见图 12）。为防止温度变化时母线伸缩使支柱绝缘子产生附加弯曲应力，又有松固定和紧固定两种，允许母线在松固定线夹中伸缩

滑动。母线固定线夹通常用铝或铝合金等非磁性材料或将其一部分（如压板）用铝或铝合金材料制成，使之不能形成闭合磁路，以免在线夹中产生涡流损耗和发热（见图 13）。管形母线也有的采用吊挂方式，用 V 形绝缘子串支撑 [见图 12 (f)]，并用螺栓 T 接或焊接 T 接。

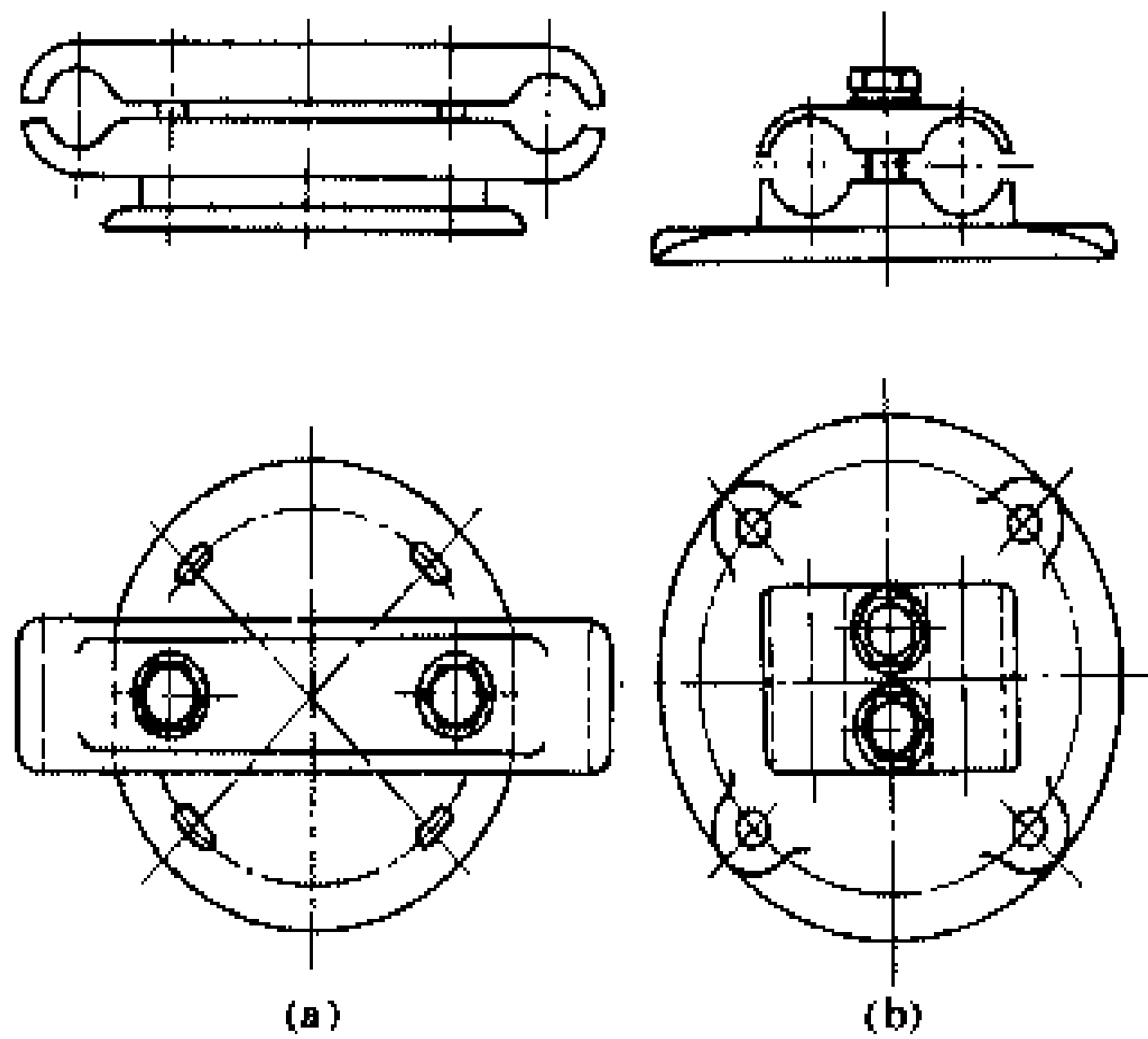


图 13 固定线夹的防涡流损耗发热  
(a) 全铝或铝合金（非磁性材料）；(b) 铝质压板（非闭合磁路）

**母线伸缩节** 用以补偿母线因温度变化而引起的伸缩的金具。铝母线伸缩节通常用 0.5 mm 的铝箔叠成与母线相同的截面，两端焊以接线板而成（见图 14）。铜母线伸缩节则用铜编织软线与铜接线板焊接而成。

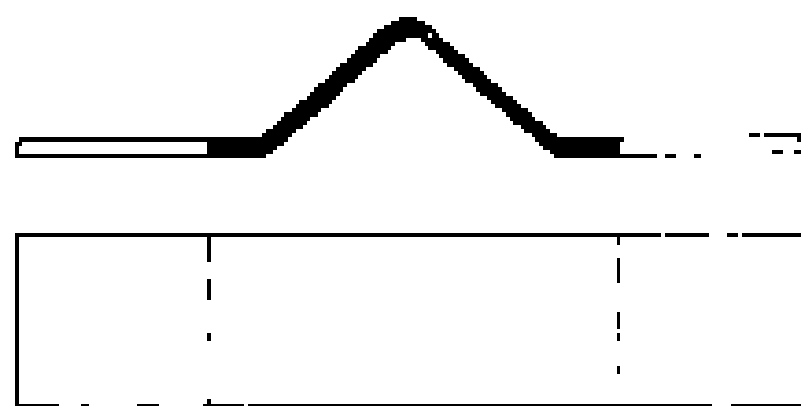


图 14 母线伸缩节

**导线间隔棒** 用于固定分裂导线的子导线之间间隔的金具。一般装设在分裂导线上相隔适当的距离处，以防止子导线之间相互碰撞（见图 15）。参见彩图插页第 7 页 24 图。

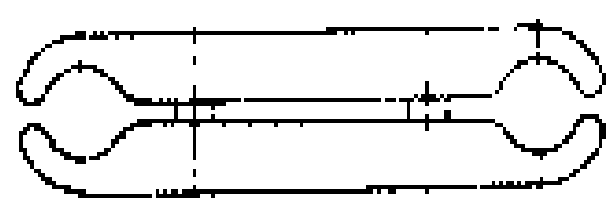


图 15 导线间隔棒（两分裂）

（董吉涛）

biandiansuo

**变电所**（substation） 电力网中的线路连接点，用以变换电压、交换功率和汇集、分配电能的设施。变电所中有不同电压的配电装置，电力变压器，控制、保护、测量、信号和通信设施，以及二次回路电源等。有些变电所中还由于无功平衡、系统稳定和限制过电压等因素，装设同步调相机、并联电容器、并联电抗器、静止补偿装置、串联补偿装置等。

**主要设施** 包括配电装置、电力变压器、控制设

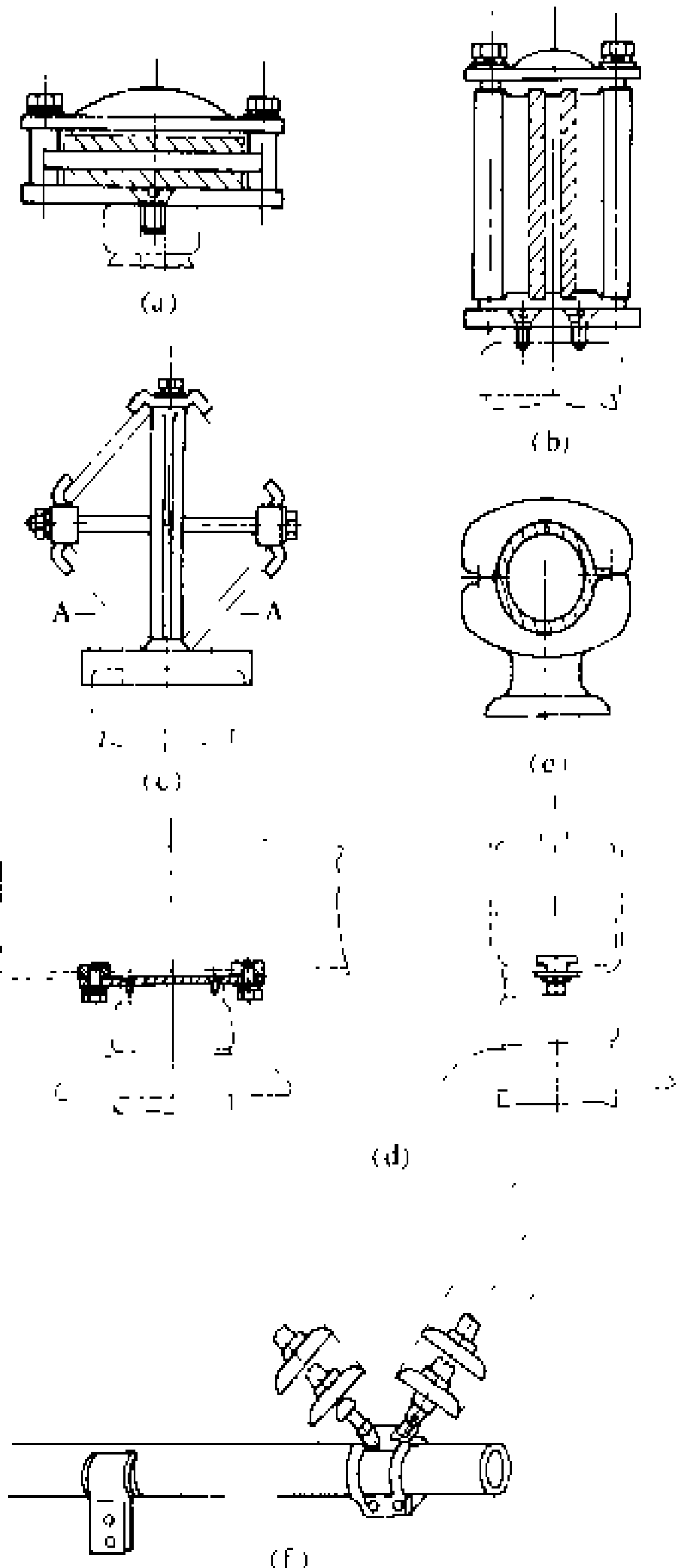


图 12 硬母线固定线夹  
(a) 矩形母线（平放）；(b) 矩形母线（立放）；(c) 菱形母线；(d) 槽形母线；(e) 管形母线（支承式）；(f) 管形母线（吊挂式）



备、保护自动装置、通信设施与补偿装置等。

**配电装置** 交换功率和汇集、分配电能的电气装置的组合设施。它包括有母线、断路器、隔离开关、电压互感器、电流互感器和避雷器等。配电装置是按照变电所电气主接线的要求进行布置的，其布置方式有屋外式和屋内式两种，屋外式布置中又有中型、半高型和高型等不同型式。6~10 kV 配电装置通常采用屋内式，35 kV 配电装置可以根据具体情况采用屋内式或屋外式，110 kV 及以上配电装置通常采用屋外式。在污秽地区或场地狭窄处，110~220 kV 配电装置则采用屋内式。气体绝缘金属封闭电器 (GIS) 则同时具有占地少和防污秽等优点，它也有屋内式和屋外式两种。

**电力变压器** 变换电压的设备。它连接着不同电压的配电装置，习惯称为变电所的主变压器。凡降低电压向地区或用户供电的变压器称作降压变压器；凡升高电压向电力网送电的变压器称作升压变压器。变电所中有两种或三种电压的配电装置时，则分别采用双绕组或三绕组降压变压器。在发电厂中，发电机均连接在升压变压器的低压绕组上。当单台发电机容量大于 200 MW 时，需采用双绕组升压变压器；当单台发电机容量小于 100 MW 时，可以采用双绕组变压器或三绕组变压器。当不同电压配电装置之间需变换功率时，可以采用联络变压器。联络变压器一般为自耦变压器或双绕组变压器，如果需要从联络变压器取得自用电电源时，则需采用三绕组变压器，从其低压绕组上引接自用电电源。变电所自用电电源也可以直接从自耦变压器的低压绕组上引接。

**控制、测量、信号、保护和自动装置** 它们是保证电气设备安全运行的监控和保护手段。控制有一对一控制和选线控制等方式，其电源有强电 (110~220 V) 和弱电 (48 V 及以下) 之分。保护有主设备保护和线路保护两类。测量有常规测量和选择测量两类，可显示各种所需的电气计量。信号有声响信号和灯光信号两种，也有强电和弱电之分。当电气设备出现不正常运行情况时，自动装置就能及时自动完成保证安全运行的操作，例如备用电源自动投入装置和自动重合闸装置等。上述各种设施均设在变电所主控制楼 (室) 内。330 kV 及以上的变电所一般建有主控制楼，通常为三层建筑物；220 kV 及以下的变电所一般建设单层主控制室；无人值班变电所一般只建设简易的控制小室。控制和保护设施均由变电所二次回路电源供电。二次回路电源包括有蓄电池直流电源、复式整流电源、电容储能电源和交流二次电源几种。220 kV 及以上变电所中采用蓄电池直流电源，110 kV 及以下不重要的变电所中通常采用其他种类的二次回路电源。

**通信设施** 有微波通信和载波通信两种。330 kV

及以上变电所中通常设置微波通信和载波通信，220 kV 及以下变电所中只设载波通信。在变电所中一般不建单独的通信楼，通信设施放在主控制楼 (室) 的通信室内。

**补偿装置** 电力网内无功功率要求就地平衡。为了平衡变电所供电范围内的无功功率，在变电所内装设同步调相机或并联电容器组；为了补偿远距离输电线路的充电功率，往往需要在变电所内装设并联电抗器；为了增强系统稳定性，提高线路输电能力，有时还需要在变电所中装设串联电容器组。

**类型** 按变电所在电力系统中的位置、作用及其特点划分，变电所的主要类型有枢纽变电所、区域变电所、地区变电所、配电变电所、用户变电所、地下变电所和无人值班变电所。中国以往曾经有过一次变电所和二次变电所之称，由于工农业的发展和负荷密度的不断增大，电压等级不断提高，一次变电所和二次变电所之称已不确切，也不适应发展的需要。变电所的名称通常是按其最高一级电压来命名的，例如某 500 kV 变电所等。

**基本要求** 主要有：①根据电力网规划明确变电所的类型和作用，以及远期和近期建设规模 (包括线路回路数和变压器容量)，使变电所的建设能起到加强电力网的作用和满足供电的需要。②变电所的建设要求少占土地，不占或少占耕地，并尽量利用荒地。在配电装置布置和变电所总平面布置上，都要采取少占土地的措施。③根据变电所的类型、建设规模和电力网中的作用确定主接线，以提高供电可靠性，并要尽量采用简单的主接线，以降低建设费用和运行费用。④变电所中的设施须能满足运行安全和检修方便的要求，凡容易发生误操作的电气设备均需装设闭锁装置，以保证人员和设备的安全。

**发展过程与趋势** 1949 年前，中国只有东北地区有少数 154、220 kV 变电所。1949 年后，随着电力建设的发展，各地区都相继建设了 220 kV 电力系统，并于 1972 年在西北地区建成了 330 kV 变电所，1981 年在华中地区建成了第一座 500 kV 变电所。国际上，美国、加拿大、苏联等国均已建成 750 (765) kV 变电所，苏联并于 1985 年建成第一个 1150 kV 输电工程，日本的 1000 kV 变电所也已于 1992 年建成。

随着用电负荷的不断增长和负荷密度的加大，变电所的电压等级和容量不断提高，不仅变压器单台容量增大，台数也在增加，对供电可靠性的要求也越来越高。同时由于环境方面的要求，变电所所址选择、线路走廊都越来越困难，因此要求变电所既可靠又尽量少占用地。有些情况下，如大城市中心区变电所往往要考虑建于地下。为尽量满足这些要求，发展趋势是：首先



简化电压层次,用高电压深入负荷密集地区,如将 220 kV 直接降至 35 kV 或以下的电压,以减少变电所数量、建设投资和电能损耗。其次是在设备方面向高可靠性和小型化方向发展,并力求具备防潮、防火性能和适应环境温度变化的要求,以及尽量延长设备的检修周期和减少检修工作量,达到免维修的要求,如各种电压等级的气体绝缘金属封闭电器的使用已日益广泛。由于设备可靠性的提高,变电所的主接线和辅助设施也逐步趋于简化和典型化,为变电所小型化、少占用地、甚至建设地下变电所创造条件,并配合系统中的遥控、遥测等手段,以及所内适当的自动化设施如事故顺序记录、故障录波、重要参数制表打印等,使变电所实现无人值班。

(梁奕荣 陶祖训)

biandiansuo buzhi

**变电所布置** (substation layout) 确定变电所内各级电压的配电装置之间以及各建筑物、构筑物之间的空间位置关系。变电所布置是一项综合性工作,涉及面较广,要经过多方案的技术经济比较后才能确定。

**布置的要求** 主要要求有:①按最终规模统一规划,远期与近期结合,以近期为主,分期建设。在电气主接线和设备已经确定的情况下,布置上要求做到整齐、紧凑、省地,便于各级电压配电装置出线,同时配电装置中使用的结构材料、导线、金具、绝缘子以及电缆特别是控制电缆也最省。②合理利用自然地形以减少土石方量和改善排水条件。重要的建筑物和构筑物尽量避开不良地质处,布置在土质均匀和地基承载力较大的地段。③各建筑物、构筑物和设备之间的距离符合防火的要求。电力变压器、并联电抗器和并联电容器等采取防火和防爆措施。对主要建筑物和生活设施,根据当地的气候、日照和风向等条件确定最佳的朝向。④为了防止噪声对工作人员的不良影响,有人工作和生活的建筑物与变压器、电抗器、同步调相机等设备之间留有足够的距离,或改善门窗的结构。⑤变电所内的通路要满足于施工、生产和检修时运输的需要,并考虑日常运行巡视和消防的要求。变电所内和配电装置场内一般设有环行道路。⑥采用绿化措施以减少灰尘和降低噪声并美化环境,但要注意电气设备的安全距离,并与周围环境相协调。

**330~500 kV 变电所布置** 这类变电所一般都是电力系统中的枢纽变电所,所区占地面积较大,建筑物和构筑物较多,并且具有三种电压等级的配电装置。变电所在布置上通常分成生产区、附属设施区和所前设施区,或将后两个区合并。为了方便生产和生活,办公

和生活设施一般都设在所前区内,主要建筑物则设在所前区和生产区之间。

**配电装置布置** 配电装置场地是安装电气设备的主要场所,也是运行巡视和维护的主要对象,对变电所的布置起着主要的作用。330kV 及以上配电装置一般都采用屋外式,因为屋内配电装置土建结构复杂,建筑体积大,造价也贵。当变电所建在严重污秽地区或场地受到限制时,经技术经济比较后,有时可以选用气体绝缘金属封闭电器。

**主控制楼布置** 主控制楼是变电所的控制中心。330 kV 及以上变电所中的主控制楼为多层建筑,楼内除有控制室外,还有继电器室、计算机室、自用电室、蓄电池室,以及检修、试验和办公等处所。主控制楼位置的要求是:①运行人员在控制室内能方便地观察屋外配电装置中电气设备的运行情况;②由于运行人员需要定时巡视检查主要设备,因此主控制楼位置要有利于选择最佳巡视路径,如有高型屋外配电装置时,通常将主控制楼与之用天桥连接;③各级电压的配电装置与主控制楼之间有大量电缆连接,所以主控制楼需位于电缆敷设长度短和耗用量少的地方。

**主变压器布置** 为便于各电压等级配电装置的电气连接,一般是布置在各配电装置的中间位置,并具有搬运和就地进行检修的便利条件。

**无功功率补偿装置布置** 无功功率补偿装置有并联电容器组、静止补偿装置、同步调相机和高、低压并联电抗器。高压电抗器连接于高压线路侧,其他无功功率补偿设备则连接在主变压器的低压侧。电容器组和静止补偿装置一般都能布置在主变压器的附近。同步调相机多数设在厂房内,并配备有冷却水设施等,它的安装场地是在变电所总体布置中确定的,并尽量靠近主变压器,以简化连接线。

**通信设施布置** 主要是设置载波和微波机房,如需单独设置通信楼时,一般都布置在主控制楼附近。

**辅助生产建筑物布置** 主要有空气压缩机站、油库、采暖锅炉房、汽车库等,这些建筑物通常是根据场地条件进行布置。

**110~220 kV 变电所布置** 这类变电所可以是电力网中的枢纽变电所,或者是交换功率并以 6~35 kV 向地区供电的区域变电所,或者是降压后向地区供电的地区变电所。主要配电装置一般都采用屋外式,当周围环境污秽或场地狭小时,则改用屋内式,只有当场地特别受限制的地方(如在城市市区内),才采用气体绝缘金属封闭电器。这类变电所中的 35 kV 配电装置通常都采用屋内式。主控制楼的大小根据变电所的规模确定,当变电所中有三种电压的配电装置时,主控制楼为多层建筑物,并布置在各配电装置的中心。当变电所

中只有两种电压的配电装置时，通常只建单层的控制室。这类变电所中的 6~10 kV 配电装置均为屋内式，且多数与主控制楼或单层控制室相连接。

**6~63 kV 变电所布置** 这类变电所是向地区供电的地区变电所，或者是向工矿企业供电的用户变电所，只有两种电压的配电装置。63 kV 变电所设在乡村地区时，63 kV 配电装置通常采用屋外式，6~10 kV 配电装置采用屋内式或屋外式。当变电所设在城镇地区时，则 63 kV 和 6~10 kV 配电装置通常都采用屋内式。主控制室常为单层建筑物，并且在布置上与屋内配电装置连接起来。这类变电所中各种建筑物多集中布置，以节约用地。6~10 kV 变电所是向小型工业企业或居民区供电的配电变电所，其建筑简单，全部设备都在屋内并与控制室相连接，甚至采用屋外柱上式布置方式，这时不再设单独的控制室，而与其他建筑物合并。

(翁保光)

biandiansuo daidian shuichongxi

**变电所带电水冲洗** (live-line washing in substation) 用压力水流清洗变电所电气设备电瓷外绝缘上的污秽，以防止变电所污秽闪络的一种带电作业方式。带电水冲洗分为移动式带电水冲洗和固定式带电水冲洗。带电水冲洗时的人身安全主要由喷嘴与带电设备之间的水柱长度以及足够的水电阻率来保证。设备安全主要由足够的水电阻率、掌握设备瓷件的污秽程度和正确的冲洗方法来保证。中国是先有移动式带电水冲洗，而固定式带电水冲洗最近几年才在西北和华东地区开始采用。

**移动式带电水冲洗** 由操作人员手持冲洗工具对带电设备进行冲洗。冲洗工具由水泵、水枪和引水管构成。中国的国家标准 GB13395《电力设备带电水冲洗规程》中规定了移动式带电水冲洗的技术条件、冲洗工具、冲洗方法和安全措施。按照水枪喷嘴口直径的大小，将冲洗方式分为小水冲、中水冲和大水冲三种。规定的水冲洗时水枪喷嘴口与带电体之间的安全距离见

喷嘴口与带电体之间的安全距离 (m)

喷嘴口直径(mm)		≤3	4~8		9~12	
喷嘴口接地方式		接地或不接地	接地	不接地	接地	不接地
额定电压(kV)	10~63	0.8	2	3	4	5
	110	1.2	3	4	5	6
	220	1.8	4	5	6	7

表。规定水枪喷嘴出水的电阻率不得低于 1500 Ω·cm，冲洗 220 kV 设备时水电阻率不得低于 3000 Ω·cm，同时还规定了水电阻率与临界附盐密度（使设备电瓷外

绝缘冲洗闪络概率低于万分之一的最大等值附盐密度）的关系。为避免被冲洗设备发生闪络，对垂直或倾斜安装的设备要求自下而上冲洗，对水平安装的设备自导线侧向接地侧冲洗，对直径大的瓷件则用两支水枪从两侧冲洗。

**固定式带电水冲洗** 在电气设备周围设置一定数量的喷嘴，经由供水管道供给冲洗用水，起动水泵即可对电气设备进行冲洗。固定式带电水冲洗分为喷射式水冲洗和水幕式水冲洗两类。喷射式水冲洗是用于一般风力下的冲洗方式，喷嘴装设在被冲洗设备周围，按照预定程序，对设备依次进行清洗。水幕式水冲洗是用于强风下的冲洗方式，喷嘴装设在设备的迎风面上，当强风袭来时，清洁的水向上喷出形成一个水幕，防止强风将海盐吹到绝缘子上。固定式水冲洗的喷嘴形状与移动式水冲洗的单孔喷嘴不同，有多孔的针形喷嘴和少孔的扇形喷嘴两种类型。水流的压力与喷嘴孔眼的多少、孔径的大小及要求水柱的射程等因素有关。喷嘴的材料通常为不锈钢或工程塑料。固定式水冲洗可由人工操作或按一定程序自动控制。

参见彩图插页第 14 页 44 图。

(徐通训 王如璋)

biandiansuo daidian zuoye

**变电所带电作业** (live-line work in substation; hot-line maintenance in substation) 在变电所中对不能停电维修的电力设施和电力设备进行带电维护和修理的工作。变电所带电作业包括带电测试、带电维护修理以及带电更换部件等内容。

变电所内的电力设施与电力设备，其维护修理工作有一部分是有条件停电维修不需带电作业的，还有一部分是需要带电作业，而且带电作业更为有利和有效的。例如带电水冲洗就是变电所中带电作业的一项重要内容，它是用高压水流冲洗绝缘子和电气设备套管上的污秽。（见变电所带电水冲洗）

变电所中带电测试或更换线路绝缘子等工作，与输电线路带电作业的内容基本相同。

(徐博文)

biandiansuo dianci yu huanjin yingxian

**变电所电磁与环境影响** (electromagnetic environment of substation) 见输配电电磁与环境影响。

biandiansuo dianlan xuanze

**变电所电缆选择** (selection of cables in substation) 变电所中的继电保护装置、控制装



置、测量设备、通信设备以及一些高压电气设备之间的连接,都需要选用电缆。变电所中有控制电缆、电力电缆和一些通信电缆。

**控制电缆** 变电所二次回路中的连接电缆一般采用铜芯电缆。控制电缆的芯数和截面按继电保护、控制和测量等回路的技术要求选取。对断路器分相控制、双重化继电保护的同一回路、低电平信号与脉冲幅值高的回路(如变换器、分合闸回路等),在同一通道中不能合用同一根多芯控制电缆,以防止受电磁感应的干扰影响。

在需要抑制干扰强度的场所或回路中(如位于220 kV及以上配电装置内、邻近大电流回路平行敷设且传输低电平信号等),一般采用具有金属屏蔽层的控制电缆,它不但可以减少静电耦合与电磁感应的影响,而且也可以减少因暂态电流或雷电流使地电位升高而出现的干扰电压,防止变电所二次回路中发生误动作或绝缘损坏。

控制电缆的绝缘层一般用橡胶或聚氯乙烯材料做成,其绝缘水平不低于500 V。在330~500 kV变电所中,由于雷电过电压的影响,要求控制电缆具有较高的绝缘水平,如采用无金属护层全塑型控制电缆时,绝缘水平不低于1000 V。

**电力电缆** 变电所内电力电缆用于自用电变压器的高、低压回路中,当变电所内装设有同步调相机时,其励磁回路中也使用电力电缆。电力电缆通常为铝芯电缆,但截面小于4 mm<sup>2</sup>时,则要求采用铜芯电缆。电力电缆的相间额定电压不低于使用回路的工作线电压,电缆芯与屏蔽层或金属护套之间的耐受电压与中性点接地方式有关。电力电缆如为固式绝缘电缆时,不要采用纤维外护层,以避免着火。

**通信电缆** 变电所与调度所以及变电所与电信局之间通信联系所使用的电缆。通常为多对多芯的通信电缆。变电所与调度所之间有时也采用通信光缆。

**电缆防火** 对重要的公用回路(如直流电源、消防、报警、事故照明等)或双重化继电保护回路,选用阻燃电缆,或用普通电缆进行耐火处理,或将同一用途的双回路电缆布置在有耐火板隔开的互相独立的通道中。在通向变电所主控制楼的电缆通道中设置阻火墙,在通向控制室和继电保护盘室电缆层的竖井或墙孔等处采取阻燃封堵措施。将靠近含油设备(如电压互感器、电流互感器等)的电缆沟盖板封实。电缆沟和电缆隧道中的阻火墙采用矿渣棉等软性耐火材料。孔洞处用具有一定强度可切割的耐火板材或堵料来封堵。在对电缆采取耐火处理和防延燃措施后,电缆的载流能力将有所降低。电缆通过厚度较大的阻火墙处,电缆芯温升也将增高,通常是在运行一段时间之后便挪动一

下阻火墙的位置。(见电缆防火)

(李熙谋)

biansuansuo erci hui lu

**变电所二次回路** (instrument and control circuit of substation) 变电所电气设备的控制、信号、测量、保护和自动装置的接线回路。它是保证变电所电气设备安全、可靠和经济运行的重要环节之一。

**控制系统** 变电所的值班方式分为有人值班和无人值班两种。有人值班方式是由值班人员在控制室内集中操作电气设备,也可以设置遥控回路由调度所对变电所实行遥控。无人值班方式通常是由调度所通过远动装置对变电所实行遥控,在变电所内设控制小室或在就地屏(柜)上操作电气设备。对一些工矿企业或农村小型变电所,可以只设简单的就地操作设施。

控制系统按其电源电压高低不同分为强电控制和弱电控制两种;按控制对象的操作方式不同分为一对一控制和选线控制两种。强电控制通常为一对一控制方式;弱电控制可以为一对一控制方式,也可以是选线控制方式。

**强电控制** 直流电源电压为110 V或220 V的强电一对一控制,即一个控制开关操作一个控制对象,如断路器、隔离开关等。这种方式接线简单,操作可靠。强电控制开关通常采用通用组合开关,它的外形尺寸较大,在控制对象多时,控制屏面积加大,运行监视面也较大。有些变电所采用强电小开关,它的外形新颖,尺寸小,在电气主接线复杂、控制设备多的变电所中得到较多采用。

控制回路按分、合闸回路的监视方式分为灯光监视和音响监视两种。控制接线分为控制开关具有固定位置不对应起动接线和控制开关触点自动复位接线两种。有人值班变电所中常采用灯光监视和控制开关不对应起动接线;无人值班变电所则常采用音响监视和控制开关触点自动复位接线。

断路器的控制回路除完成断路器的分、合闸操作外,还能指示断路器的分闸和合闸的位置状态,对自动合闸和事故分闸也有明显的显示,同时还具有监视分、合闸线圈完整性和防止“跳跃”的闭锁回路。220 kV及以上输电线路断路器、母线联络兼旁路断路器、分段兼旁路断路器和专用旁路断路器通常为分相操动机构,如设置综合重合闸或单相重合闸装置时,断路器控制回路通常具有单相和三相重合闸的功能。对变压器、母线联络和分段断路器通常则采用三相操动机构。

断路器的控制回路按其操动机构接线的要求设计,断路器的操动机构有电磁、弹簧、空气和液压机构

等。电磁操动机构的合闸电流大，通常用于 35 kV 及以下的断路器，110 kV 及以上的断路器则通常采用其他型式的操动机构。对各操动机构控制回路的要求是相同的，但接线各具特点，例如电磁操动机构的合闸线圈要通过直流接触器触点接通，弹簧操动机构需有弹簧未拉紧闭锁接线，液压和空气操动机构当压力降低到规定值时，具有相应闭锁重合闸装置，液压操动机构一般不采用压力降低至规定值后自动跳闸的接线。

变电所中 500 kV 倒闸操作用的隔离开关，一般能远方和就地电动操作。500 kV 检修用的隔离开关、220 kV 隔离开关、接地刀闸和母线接地器等则均为就地电动操作。110 kV 及以下隔离开关均为就地手动操作。远方操作隔离开关的控制回路可为直流操作或交流操作，就地电动操作的隔离开关通常为交流操作。为了防止隔离开关误操作，其控制回路设有与有关断路器和设备操作闭锁措施。

**弱电控制** 通常指直流电源电压为 48 V 及以下的弱电一对一控制。弱电控制的优点主要是控制设备小，控制监视面小，运行操作方便，而且比选线控制接线简单，控制电缆截面相应减小。弱电控制在 500 kV 变电所中得到广泛使用。

断路器的操动机构通常为 110 V 或 220 V 系统，弱电控制回路通过强弱转换继电器的触点，引到断路器操动机构处，去执行分、合闸命令。

弱电控制回路的要求与强电控制回路是相同的，但弱电控制的分、合闸脉冲先启动分闸和合闸继电器，其线圈电压为弱电，而其触点则要求接通操动机构的分闸或合闸线圈。因此，要求继电器触点容量大且可靠。同时，弱电回路具有较强的抗干扰性能，要求强电和弱电电缆分开敷设。断路器操动机构的强电回路要求设置可靠的电源，且有电源监视装置。弱电控制的 500 kV 变电所，要求设置可靠的弱电电源，多数由设有两组蓄电池的直流系统供电。

将继电保护和自动装置、强电的分闸和合闸继电器、变送器等就地布置，可以使控制室和被控制设备之间的联系大为简化，节省控制电缆，减少主控制室的面积，更能显示出弱电控制的优点。中国和世界各国有些变电所都在配电装置中设继电器室。

**选线控制** 由一个控制开关通过选择元件来控制一批同类型电气设备的控制方式。这种控制方式操作一个电气设备分两个步骤进行，首先是选择操作对象，确认无误后再由控制开关执行分、合闸命令，以完成分、合闸操作的全过程。110 kV 及以下的变电所，当线路数量较多或远方操作的隔离开关数量很多时，可以采用选线控制方式。

选线控制的电源可以采用强电电源，也可以采用

弱电电源，弱电选线控制时由无触点器件或电磁继电器构成。

选线控制接线分选线按钮(或选线开关)和编码选线两种方式。选线按钮布置在控制屏(台)的主接线模拟线上的设备标志处，当需操作某设备时，先按下该设备的选线按钮，选线对象模拟灯显示正确后，操作公用的分、合闸控制开关，即完成对被选对象操作的全部过程。编码选线是将断路器编有数字号码，当需操作某设备时，先按具有数字编码的按钮，与该设备的数字号码一致时，在操作台上的投影显示器上显示出被选对象的号码，同时对象模拟灯闪光，值班操作人员核对无误后再操作公用的分、合闸控制开关，即完成对被选对象操作的全部过程。

为了保证选线控制可靠，通常设有先选有效、后选有效或选重闭锁回路，以保证一次操作只允许选择一个操作对象，同时设有手动和事故自动解除选线控制的回路。

选线控制的控制屏(台)为屏台合一结构或控制台与返回屏分开的结构。前一种方式操作监视集中，接线较简单，适用于中小型变电所。后一种方式适用于主接线复杂、操作对象多的大型变电所。

**信号系统** 变电所中设置事故警报信号、预告信号和事故分析信号，它们都由中央信号装置来实现。信号系统的电源可以采用强电电源，也可以采用弱电电源。强电控制可用强电或弱电信号，弱电控制或选线控制则多数用弱电信号。

在中国，中央信号装置多数以冲击继电器为核心构成，它设置若干信号小母线，事故或预告信号则通过相应的小母线使冲击继电器动作，发出音响及灯光显示信号。现在中国和世界各国都在信号系统中广泛采用闪光报警装置，它由单个信号元件构成，采用积木式结构，具有确认、复归、试验和消音等功能。预告信号或事故分析信号的灯光能闪光，信号的出现和消失都有明显的表示。闪光报警装置和计算机系统联系方便，不受信号动作次数的限制。

事故警报信号要求能重复动作，并能延时自动或手动解除音响。在设备发生故障发出事故音响信号的同时，事故跳闸的断路器位置信号灯发出闪光，表示事故发生的地点。

预告信号通常只设瞬时预告信号，当发生异常运行情况时，在发出音响信号的同时，光字牌显示灯光信号。对一些瞬时性的信号，例如断路器三相位置不一致或直流电源短暂消失等，可能很快消除，如发出音响将干扰值班人员的注意力和思维，所以可使预告信号带有 0.3~0.5 s 的延时。对个别需要长延时的信号，例如过负荷信号等，可以用外加时间继电器的方法来实

现。预告信号的音响可以手动复归,也可以采用音响自动延时复归的接线。

事故分析信号是在事故警报信号发出音响的同时,能在光字牌上直接显示事故性质,以便于运行人员及时判断和处理事故。

事故警报信号和预告信号回路均设置试验回路。事故警报信号发生时也可以设停电钟回路,以确定事故发生的时间。

预告信号和事故分析信号有一对一直接显示和间接显示两种。一对一直接显示信号方式能及时判断和分析异常运行的性质及发生地点,预告信号光字牌布置在相应的设备控制屏上。间接显示信号方式又分两种,一种为相同性质的预告信号光字牌共用,当发生异常运行时,光字牌显示异常运行的性质,发生地点则用断路器的位置模拟灯的闪光来表示;另一种为坐标信号,当发生异常情况时,纵坐标上方的光字牌显示异常情况的性质,横坐标一侧的光字牌显示发生异常运行的地点,纵横坐标交叉的信号灯闪光。间接信号接线较复杂,而且当先后发生两个异常信号时,不容易分辨出异常运行或事故的先后次序及地点,但它使用光字牌数量少,控制屏面积也小,在弱电信号系统中常被采用。

断路器的位置信号有灯光监视和音响监视两种。灯光监视通常设红绿灯,红灯表示合闸状态,绿灯表示分闸状态。音响监视信号一般用嵌在控制开关把手内的灯表示断路器位置。

大型变电所中倒闸操作的隔离开关要求设置自动位置指示信号。对小型变电所则可用手动位置指示牌。对变压器调压装置的分接头切换开关也要求设置自动的位置指示信号。

**测量系统** 根据运行监视需要,变电所的电气设备配置有必需的测量表计。对测量表计的要求是准确可靠、技术先进和监视方便。测量表计有常测表计和选测表计两类。变电所值班人员通常不需经常监视表计,除主变压器和同步调相机等要求装设常测表计外,对数量很多的线路,只留少量的常测表计,例如 220 kV 以上线路上设置有功功率表和无功功率表以外,电流表则为选测表计,这样既可满足定时监视和抄表的要求,又可节省表计以缩小控制屏(台)的面积。过多的电气设备共用选测回路时,接线比较复杂,监视也不方便,一般按电压等级或相同设备分为若干组。用选测按钮来选择测量对象,按钮除有机械闭锁外,接线中还设有电气接线闭锁回路,保证一次只能测量一个对象的参数。

测量回路可以采用强电电源,也可以采用弱电电源。强电回路的电流为电流互感器的二次侧电流 5 A

或 1 A,电压为电压互感器的二次侧电压 100 V。弱电回路的电流,如果电流互感器二次侧电流为 5 A,通过变比为 5/0.5 的中间变流器变换为 0.5 A;如果电流互感器二次侧电流为 1 A,弱电回路电流可不变换仍为 1 A。弱电回路电压可直接用电压互感器的二次侧电压 100 V,或通过变比为 100/50 的中间变压器变换为 50 V。接于变送器二次侧的仪表,其参数为变送器的输出参数,可选用 0~5V、0~5 mA 或 4~20 mA 等。当变电所中装设有遥测装置或微处理机监测装置时,二次仪表则与它们共用变送器。

装在屏(台)上的电测量仪表的综合准确度要求不低于 1.5 级。接于变送器二次侧的仪表的综合准确度不低于 1.0 级。与仪表连接的互感器、分流器、变送器等,互感器的准确度通常为 0.5 级,中间变送器为 0.2 级。

变电所采用微机监测或远动终端装置(RTU)具有就地监测的功能时,通常要适当简化测量仪表,并由微处理机或 RTU 的屏幕显示器(CRT)进行显示,并由打印机进行制表打印。

**同步系统** 电力系统中的变电所需要经常解列和并列时,通常都装设带有非同步闭锁的手动准同步装置,或装设半自动准同步或捕捉同步装置。当变电所中装有同步调相机时,通常装设自动准同步装置。

半自动准同步装置可分恒定导前时间和恒定导前相角两种,它们分别保证在某一给定导前时间或导前相角下发出合闸脉冲,自动将断路器合闸。捕捉同步装置是检查两系统的频率差小于允许值( $-0.5 \sim +0.5$  Hz),根据断路器的固有合闸时间,提前发出合闸脉冲,保证断路器合闸时两系统之间的电压夹角小于规定值。

变电所同步系统通常为单相接线。

**变电所微机监测** 主要由微处理机构成事故记录 and 数据处理装置,它能进行数据采集,对运行系统参数及设备状态进行监视,具有召唤显示、越限报警和定时制表打印等功能。它通过屏幕显示器对主要系统接线进行画面显示,并由打印机制表打印。微机监测的功能除使运行人员能及时发现和判断事故、指导对设备的操作和控制外,还可以减少运行人员巡视抄表等繁杂劳动,提高管理水平。通过变电所微机监测系统的事事故顺序记录和显示及对历史数据处理和事故追忆,能够为运行人员分析事故提供准确、可靠的依据。变电所微机监测装置还具有通过键盘进行人机对话和修改程序的功能。在微处理机容量允许时,还能够实现网络控制及部分管理功能。微处理机监测装置一般均配置屏幕显示器、事故打印机、报表打印机、输入打字机等外围设备。微处理机监测装置和变送器的电源,通常由交

流不停电电源装置 (UPS) 供电。

如果变电所远动装置 (RTU) 具有上述微机监测系统的各项功能, 就可以不另设微处理机监测装置。目前中国多数变电所的 RTU 装置功能不能满足上述的全部要求, 运动装置不能与变电所同时投产, 所以多数变电所的微处理机监测装置和 RTU 各成独立系统, 但它们之间的信息来源和处理功能可以共用。

**弱电二次回路抗干扰措施** 弱电无触点晶体管器件构成的控制和信号装置等, 由于它的动作速度快、灵敏系数高和结构布置紧凑等特点, 故需采取抗干扰措施。主要有: ①当高压母线上有高频电流通过时将在二次回路中感应出干扰电压, 所以二次回路的电缆要尽量远离母线和缩短平行长度, 以减少电磁耦合。弱电二次回路还要远离高频暂态电流的入地点, 如避雷器和避雷针的接地点、电容式电压互感器和耦合电容器等。②弱电二次回路的电缆在配电装置内的走向按辐射式或树枝状敷设, 不要出现环状回路, 以免与电磁场交链。通常是将每一回路的往返导线安排在同根多芯电缆内, 从控制室到配电装置内任一点只能有一条路线可以到达, 同一设备的所有线路只有同一走向路径。③采用有金属屏蔽层的控制电缆, 屏蔽层的两端均接地, 以降低静电耦合或电磁耦合所造成的干扰。对无屏蔽层的控制电缆, 将其中的备用芯线接地, 在可能有较大的地中电流流过的地方, 将备用芯线的一端接地, 对去控制室的电缆, 则仅在控制室端接地。如将有屏蔽层电缆的屏蔽层与备用芯线同时两端并联接地, 则更能加强屏蔽作用。④弱电回路与强电回路的芯线不能共置在同一根电缆内, 否则强电回路的暂态干扰信号可能通过芯线之间的电容耦合传递到弱电回路中去, 这时即使将电缆屏蔽层或备用芯接地, 也不能有效地消除干扰。⑤电缆沟内的控制电缆通常要利用大地的屏蔽作用, 并在沟内还敷设有平行带状导体的接地网。⑥强电和弱电的电缆不能靠近平行敷设, 更不能在设备内部将它们捆扎在一起, 如果需在短距离内平行敷设, 则线间必须保持 2~3 cm 的距离。

**互感器的接地** 电流互感器二次绕组需有一个接地点, 通常在配电装置内经端子接地, 当由几组电流互感器与保护装置连接时, 则在保护屏上经端子接地。在中性点非直接接地的电力系统中, 电压互感器二次绕组通常采用 B 相接地方式。在中性点直接接地的系统中, 电压互感器二次绕组则采用中性点接地方式。对电压互感器的这两种接地方式, 通常均在控制室内保护屏上经端子接地。

**展望** 500 kV 及以上变电所的控制方式有集中控制和分散控制两种。中国 500 kV 变电所采用集中控制方式, 有的国家的 500 kV 及以上变电所采用分散控

制方式。分散控制方式是在变电所中除设置主控制室外, 还在各级电压配电装置中设置若干个分控制室, 用于放置继电保护装置和部分控制设备。它们之间采用近距离远动装置, 以实现电气设备的遥控、遥信和遥测, 即所谓变电所内远动形式。有些变电所在主控制室与分控制室之间采用光纤通信技术传递信息, 这种方式能够节省控制电缆, 互感器的二次负荷小, 电磁干扰问题也较易解决, 同时主控制室面积较小, 但控制室之间的信息传递较复杂, 运行管理较分散。

(牟乐友)

biandiansuo erci hui lu dian yuan

**变电所二次回路电源** (power supply of instrumentation and control in substation)

变电所中供给控制、信号、继电保护、断路器分合闸和安全自动装置的电源。变电所二次回路电源有蓄电池直流电源、交流二次电源、复式整流电源和电容储能电源等数种。

**蓄电池直流电源** 由蓄电池组、充电和浮充电装置、直流配电屏和配电网等组成的直流电源系统。中国多数变电所都采用防酸隔爆型的铅酸蓄电池, 在技术经济合理的情况下, 也采用碱性蓄电池或镉镍蓄电池。(见蓄电池)

**装设条件** 500 kV 变电所常装设 110 V 或 220 V 蓄电池组, 如采用集中控制方式, 则装设两组 110 V 或 220 V 蓄电池。330 kV 和 220 kV 变电所、110 kV 重要变电所和用其他二次回路电源不能满足继电保护或事故操作要求的 110 kV 变电所, 常装设一组 110 V 或 220 V 蓄电池。35 kV 变电所则装设低电压蓄电池组。有些变电所采用弱电控制和弱电信号, 一般只装设一组或两组 (对 500 kV 变电所而言) 48 V 蓄电池。

**容量** 蓄电池组的容量选用按以下条件计算所得结果中的最大值: ①全变电所事故停电 1h 的放电容量; ②事故放电末期发生最大冲击负荷时的容量; ③按最严重运行事故放电情况校验蓄电池组的容量, 并仍能满足直流母线电压最低允许值的要求。

**充电和浮充电** 蓄电池组都设有充电设备, 正常情况除向直流负荷供电外, 同时还对蓄电池组进行浮充电、均衡充电以及事故放电后补充电。中国充电设备过去多用电动机发电机组, 近年来已普遍采用硅整流装置, 它同时具有浮充电、均衡充电和手动充电三种功能, 其自动稳压和稳流的精度较高, 可以在额定电流值的 5%~100% 范围内稳定运行。每组蓄电池都只装设一台充电设备, 如装设两组电压相同的蓄电池时, 再装一台充电设备作为备用。当充电设备和蓄电池组并联运行时, 充电设备输出电压的波纹系数不能大于 5%。

当有晶体管保护或电子计算机等设备时,充电设备输出电压的波纹系数不能大于 2%。蓄电池组不装设端电池和调压装置,因为端电池容易硫化和老化,很难维持蓄电池的均衡一致,还增加许多维护工作量。(见充电装置)

**接线方式** 直流系统都采用单母线接线或单母线分段接线。每组蓄电池和它的充电设备都接在同一段母线上。如果充电设备为两组蓄电池共用,这台充电设备则能切换到相应的两段母线上。在电气主接线简单的 110 kV 及以下变电所中,直流配电网都采用环形供电方式。220 kV 及以上变电所、110 kV 枢纽变电所,为便于调试检修和寻找接地故障点,直流电源系统一般采用辐射状供电方式。

**交流二次电源** 变电所中的控制、信号和合闸回路直接由自用电和电压互感器取得电源,以及保护装置和断路器跳闸回路直接由电流互感器和电压互感器取得电源的总称。交流电源具有投资省和接线简单等优点,但难以适应较复杂的保护装置,灵敏度和可靠度也较低,仅适用于不重要的 35 kV 及以下的变电所。

**特点** 交流电源由自用电变压器和电压互感器经隔离变压器供电,两者经备用电源自动投入装置互为备用。正常运行时,自用电变压器为工作电源,电压互感器为备用电源。隔离变压器使两个电源变换成同一电压,当需 110 V 交流电源时,则将 220 V 自用电电压降压为 110 V;当需 220 V 交流电源时,则将电压互感器二次侧的 110 V 升压为 220 V。采用交流电源时,断路器的操动机构采用手动合闸、交流电动机合闸或弹簧蓄能合闸方式。断路器跳闸线圈由交流电压或交流电流起动。断路器控制回路接线与直接电源系统相同,并可根据需要装设自动重合闸装置。中央信号系统通常采用不重复动作的事故信号系统和重复动作的预告信号系统。闪光装置可以由交流闪光继电器构成,其接线与直流电源系统相同。

**继电保护装置** 主要的方式有:①利用附装在断路器交流操动机构中的直动式继电器跳闸,由电流互感器和电压互感器供电。这种保护装置最简单,但是灵敏度差,电流互感器二次侧负担较大,故只用于单侧电源辐射线路和小容量低压变压器的保护。②正常运行时,跳闸线圈被继电器常闭接点短路,发生故障后保护动作,继电器常开接点闭合而常闭接点打开,将断路器跳闸线圈接入电流互感器二次侧,利用短路电流的能量跳开断路器。这种方式可以构成比较复杂的保护,灵敏度比直动式继电器高。③各跳闸线圈设有自己的供电电容器,正常时由充电装置充电,故障时由预先充电的电容器向跳闸线圈供电。这种方式只用在保护动作时没有足够短路电流的情况,如瓦斯保护和接地保护

等。④由供电向保护装置和跳闸线圈供电。供电是一种小型稳压整流装置,由电流互感器和电压互感器供电,输出直流电压,容量比较小,仅用在因短路电流较小又无法利用短路电流的能量跳闸的情况下。由供电供电的二次回路与直流电源系统是一样的。

**复式整流电源** 由自用电变压器或电压互感器供电,同时由能反映故障短路电流的电流互感器供电,从而可以保证在正常和事故情况下不间断地向直流系统供电。其优点是投资省、寿命长和占地少,缺点是结构复杂、设备配套和调试较困难、可靠性受电力网运行方式变化影响。复式整流电源通常只用于不重要的 35~110kV 变电所。

复式整流电源的接线方式有单相式 and 三相式两种,其电压源和电流源又有串联和并联两种连接方式。另外,还有稳压和不稳压方式之分。

三相式复式整流接线中,直流母线电压为 220 V,其电源由自用电变压器和变电所电源进线上的电流互感器经整流后复合供电。自用电变压器经隔离变压器后整流供电,电流互感器则经铁磁谐振稳压器后整流供电。铁磁谐振稳压器的作用是保持直流母线电压不变。正常运行时由自用电变压器供给直流电源(电压源),短路故障时由电流互感器经铁磁谐振稳压器供给直流电源(电流源)。三相式复式整流供给控制、信号和保护回路用电。

单相式复式整流接线中,有可供晶体管保护装置和弱电系统用的 24 V 直流电源、供断路器跳闸和合闸操作用的 220V 直流电源。电压源通常由三相式 35/0.4 kV 和 10/0.4 kV、容量为 50 kV·A 的两台自用电变压器供给。两台变压器经常一台工作,另一台备用,装设有电源自动投入装置,然后经过一台单相铁磁谐振稳压器实行稳压。稳压器有两个输出绕组,各经一组整流桥整流以供给 24 V 和 220 V 两种直流电压。电流源由主变压器高压侧的电流互感器(主要用作中压和低压侧线路故障时的电源)和经切换开关取自高压电源进线的电流互感器(主要用作高压电力网故障时的电源)供给,经过两台单相铁磁谐振稳压器转换成稳定的交流电压,整流后供给 24 V 和 220 V 两种直流电压。正常时,电流源和电压源并联工作,两种电源采用同相电压和同相电流,电流源取自 A 相电流互感器,电压源取自 A、C 相间线电压。这样,当变压器为 Y, d11 接线时,可以保证在各种运行方式下都有直流输出。24 V 直流电源接有两组 L-C 滤波器,降低其输出电压中的交流分量,以满足晶体管保护装置的要求。在 220 V 操作电源系统中,为抑制由于波形畸变造成的输出电压尖峰,也设有一组 L-C 滤波器,以防止晶闸管回路的误导通。

**电容储能电源** 变电所可只采用硅整流装置作为直流电源,但当电力网故障引起整流电源电压下降或消失时,继电保护和断路器跳闸将因失去电源而拒绝动作。这时可以利用正常时进行充电的电容器组储存的能量作为继电保护和断路器的跳闸电源。这种设施的优点是投资少和体积小,缺点是电容器组放电电压将按指数规律衰减,只宜在 110 kV 及以下的中、小型变电所中采用。

**整流电源** 由自用电变压器引接一个电源外,还由变电所附近独立的低压电力网引接第二个电源。此外,再由变电所高压电源进线上电压互感器二次侧引接一个电源作为应急电源。正常运行时,整流电流由自用电源供给。当自用电源电压降低或消失时,电压互感器供电回路将自动投入运行,以保证控制、保护和通信等电源的可靠供电。

**电容储能装置** 配置有数组电容器,其中一组作为备用。用电容器组所储电能作为保护和断路器跳闸的电源,其负荷主要是中间继电器、时间继电器和断路器跳闸线圈。选择电容器组容量的原则是:①在电容器组放电过程中电压的衰减在继电器和跳闸线圈的动作电压范围以内;②电容器组所储能量能保证继电器和跳闸线圈可靠地动作。电容器的型式有电解电容器、金属膜电容器和电力电容器三种。电解电容器单位体积容量大、价格低,但工作电压低,且电容量随时间和温度而变化。金属膜电容器具有击穿后能自愈的性能,承受过电压的能力较高,电容量比较稳定,但单位体积容量较小,价格也较贵。电力电容器介质强度高,电容量稳定,不易老化,但体积大、价格贵,需设置专用房间。储能电容器组经常处在浮充电状态,运行条件较好。由于变电所中需要装设的电容量较大,主要考虑因素是价格低和体积小,故通常采用电解电容器。

(张嘉芬 韩伯青)

biandiansuo fanghuo yu fangbao

**变电所防火与防爆** (anti - fire and anti-explosion in substation) 变电所中充油电气设备、电缆、建筑物和构筑物均需考虑防火与防爆。

**要求** 主要有:①采用非燃烧体或难燃烧体的建筑材料;②保持所需的防火和防爆距离;③用砂和化学灭火器进行灭火;④设置防火、防爆墙或门以及蓄油、挡油、排油设施,以防止火灾蔓延扩大;⑤考虑发生火灾时人员的安全疏散条件;⑥设置报警装置,以便能及时发出信号;⑦在设备制造上考虑防火与防爆,例如干式变压器、耐火电缆、阻燃电缆和防酸隔爆密封式蓄电池等。

**措施** 主要有:①油浸变压器之间防火净距满足

可燃液体储存罐之间防火间距的要求。当屋外变压器的油量超过 2500 kg 又无防火墙时,要求 35 kV 及以下的防火净距不能小于 5 m,110 kV 时不能小于 8 m,220 kV 及以上时不能小于 10 m。如防火净距小于这些数值,则要求在两台变压器之间设置防火墙,防火墙高度不低于油枕顶部。当变压器的油量较大时,通常采用水喷雾灭火措施,这种措施在中国 500 kV 变电所中已得到较广泛的采用。在大型变电所中一般都需设置水消防系统。②35 kV 以下的断路器和油浸互感器要求安装在开关柜内或两侧有隔墙间隔内,35 kV 及以上时则安装在有防爆隔墙的间隔内。对油量超过 1000 kg 的屋内油浸变压器,要求安装在单独的防爆间内。对屋内和屋外配电装置中的充油设备,要求设置储油和挡油设施。③当变电所内有蓄水池或附近有消防管道时,在主要建筑物内和附属建筑物屋外附近设置消防栓。采用泡沫、二氧化碳、“1211”等化学灭火器,其中“1211”灭火器效能高、绝缘性能好,且对金属无腐蚀。用砂灭火简单方便,对地面和沟道内油质物灭火的效果较好。④长度大于 7 m 的配电装置室要求设两个出口,长度大于 60 m 时再增加一个出口,以保证事故时人员能迅速离开现场。配电装置室的门应为向外开的防火门,相邻配电装置室之间的门应能向两个方向开。此外,变电所主控制楼中的主控制室、电缆层和底层的出口也不能少于两个,但第二层以上的第二个安全出口通常设在通向室外楼梯的平台处。⑤变电所内要求有环形的消防通道,以便事故时消防车辆通行。⑥蓄电池室内如装有敞开式铅酸蓄电池时,要求采用防火防爆措施,例如采用防爆安全灯具、装设防爆门等。蓄电池室内如装设密闭式防酸隔爆蓄电池,则可适当降低蓄电池室防火防爆的要求。⑦主控制室与电缆层之间、电缆沟或隧道与建筑物交界处的孔洞,以及通向变电所外墙处和其它预留的孔洞,都要求用耐火材料封死。⑧充油电缆一般埋在砂中,如要明敷设时,要在接头等部位用阻燃材料包上,在电缆外层涂刷防火涂料。

**发展概况** 四氯化碳灭火器已逐渐被“1211”灭火器所取代,采用水幕对充油电气设备灭火并控制火灾的蔓延也逐渐得到应用。从设备制造本身解决防火与防爆问题越来越受到重视,例如制造阻燃电缆、耐火电缆、干式变压器、高压干式空芯并联电抗器、环氧树脂互感器、六氟化硫断路器等。

(叶景星)

biandiansuo fanglei

**变电所防雷** (lightning protection of substation) 为保证变电所正常运行而采取的防止雷

害的安全措施。变电所防雷分为直击雷防护和侵入波防护两个方面。

**直击雷防护** 变电所直击雷防护的对象包括屋外配电装置、高建(构)筑物、易燃易爆对象。一般采用避雷针或避雷线作直击雷防护。

防止雷击避雷针(线)引起的反击 防止反击的措施是装设独立避雷针,避雷针与被保护物间保持足够的空间距离 $S_a$ 。(见图1)。 $S_a$ 可用下式估算

$$S_a \geq 0.3R_i + 0.1h \quad (1)$$

式中 $S_a$ 为空间距离,m; $R_i$ 为冲击接地电阻, $\Omega$ ; $h$ 为避雷针空间距离校验点的高度,m。

采用避雷线时的空间距离可用下式估算

$$S_a \geq \beta (0.3R_i + 0.16(h + \Delta l)) \quad (2)$$

$$\beta \approx \frac{l - \Delta l + h}{l + 2h} \quad (3)$$

式中 $\beta$ 为分流系数,避雷线只有一端接地时, $\beta=1$ ; $\Delta l$ 为所考虑点到最近一端杆塔的距离,m; $l$ 为避雷线两端杆柱间的距离,m。 $S_a$ 一般不小于5m。

独立避雷针及避雷线的接地装置与被保护物接地体之间要求保持一定的地中距离 $S_g$ ,以免在地中发生闪络。 $S_g$ 亦可利用上面的公式计算,计算时取 $h$ 、 $l$ 和 $\Delta l$ 为零即可。 $S_g$ 一般不小于3m。

对于63kV及以下的变电所,由于绝缘强度较低,一般不允许将避雷针装在构架及屋顶上,以免发生反击。一般也不允许将避雷针装在变压器的门型构架上。

独立避雷针的工频接地电阻不大于10 $\Omega$ 。当避雷针装在构架上时,要求土壤电阻率 $\rho \leq 500 \Omega \cdot m$  (63kV)和 $\rho \leq 1000 \Omega \cdot m$  (110kV及以上),并在装设避雷针的构架下埋设辅助的集中接地装置,它与变电所接地网的连接点,与主变压器接地网的连接点之间的距离不小于15m。

装设避雷针(线)的注意事项 主要有:①避雷针距人员经常通行的道路的距离要在3m以上,否则应采取均压措施,以保证人身安全;②严禁将架空照明线、电话线、广播线、无线电天线等低压或弱电线路架设在避雷针上或其下面的构架上;③当必需在避雷针上装设照明灯时,其电源线要用铅皮电缆或将导线穿入金属管,并在电缆或金属管引下后直接埋入地中,埋入部分的长度不应小于10m;④避雷线有两端分流的

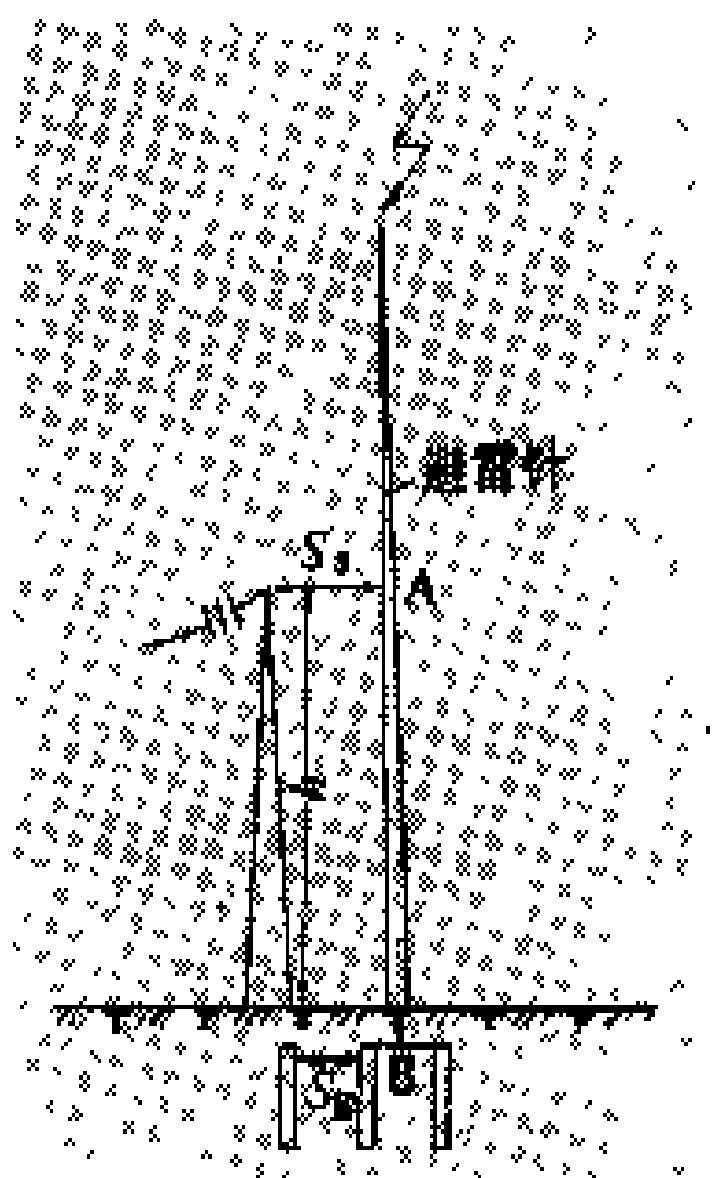


图1 避雷针与被保护物间的空气距离示意图

特点,故对63kV及以上的变电所允许将线路的避雷线接到变电所构架上,但以满足对土壤电阻率的要求为前提,同时,应在此构架处埋设辅助的集中接地装置。

微波通信站防雷保护 如果微波天线固定在微波塔上,则塔的金属结构也可作为接闪器。微波塔的接地电阻一般不超过5 $\Omega$ ,在有利条件下可不超过1 $\Omega$ 。接地体围绕塔基做成闭合环形,以降低接触电压及跨步电压。照明线的接法与在避雷针上装设照明线的方法相同。

波导管或同轴电缆的金属外皮,至少应在上下两端与塔身金属结构连接,并在计算机房内与接地网连接。

计算机房应有防直击雷的保护措施。沿房顶四周,敷设闭合均压带。在机房外,围绕机房敷设水平闭合接地带。在机房内,围绕机房敷设环形接地母线。各种电缆金属外皮、设备金属外壳、不带电的金属部分、金属管道、金属进风道、金属门框、建筑金属结构、走线架、滤波器架、保护接地、工作接地等,都以最短距离与环形接地母线连接。户内环形接地母线,户外闭合接地带和房顶闭合均压带间,用不少于4个对称布置的连接线互相连接,相邻线之间距离不超过18m。

机房的接地网与微波塔的接地网之间,要有不少于2根接地带连接。

机房内的电力线和通信线,要敷设于金属管内。金属管在屋外埋入地中的长度不要小于10m。由机房引到附近建筑物内的金属管道,在机房外埋入地中的长度也要大于10m。

如果将微波天线装在独立避雷针上,则所采用的防雷保护措施与将微波天线装在微波塔上时相同。

**侵入波防护** 为了限制从输电线路侵入到变电所的雷电过电压,变电所母线上一般采用阀式避雷器加以保护。当雷电波侵入到变电所后,会在各个结点上产生复杂的折射与反射过程,从而在被保护设备上产生围绕避雷器残压而振荡的过电压波。侵入波的陡度越大,被保护设备离避雷器越远,振荡波的幅值也越高。为限制侵入波的陡度和幅值,对于35kV及以上的变电所要求设置进

线保护。

图2为35~110kV变电所的进线保护接线图,即在临近变电所的1~2km的一段线路上,加强

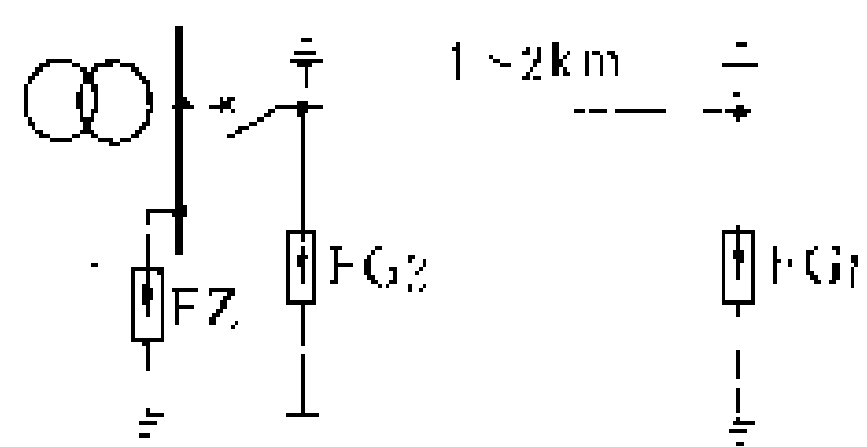


图2 35~110kV变电所的进线保护接线

防雷措施,以降低该段线路雷电的直击、反击及绕击于导线的概率。这样,雷电流需经1~2km的路程才进

入变电所，衰减的结果使侵入波的幅值和陡度均有所降低，并由母线避雷器将来波幅值限制到允许水平以下。在采用木杆或木横担的线路中，为了降低侵入波的幅值，在进线段首端装设管型避雷器FG1。为了保护开路状态的断路器和隔离开关，进线段的末端加装管型避雷器FG2。图3所示为电缆进线的保护接线。

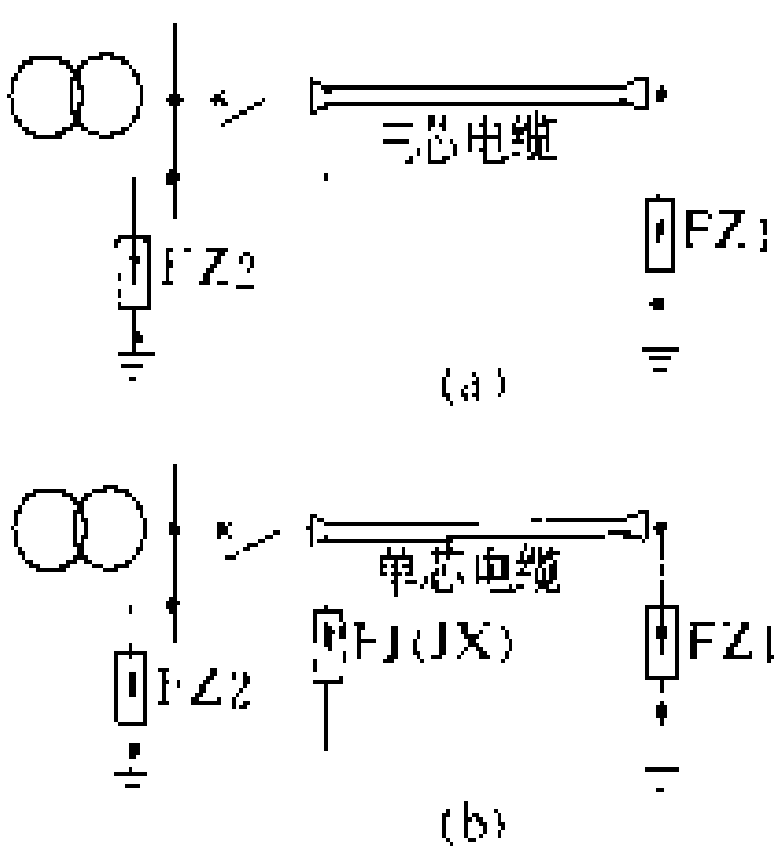


图3 具有35 kV及以上电缆的变电所进线保护接线 (a) 三芯电缆进线；(b) 单芯电缆进线

为了减少所装设的避雷器的数量，在中国与苏联一般将避雷器安装于母线上的某一适当位置，以便兼顾主变压器和其他电气设备的保护。为此，中国和苏联的规程中列出了侵入波的计算陡度(见表)和避雷器与变压器之间的最大电气距离与计算陡度的关系曲线(见图4)。在确定避雷器与变压器之间的电气距离时，还需考虑变电所母线出线回数的影响(见图5)。在三路进线时，避雷器与变压器间的最大电气距离可以允许比两路进线时增加20%，四路以上进线时允许增加35%。

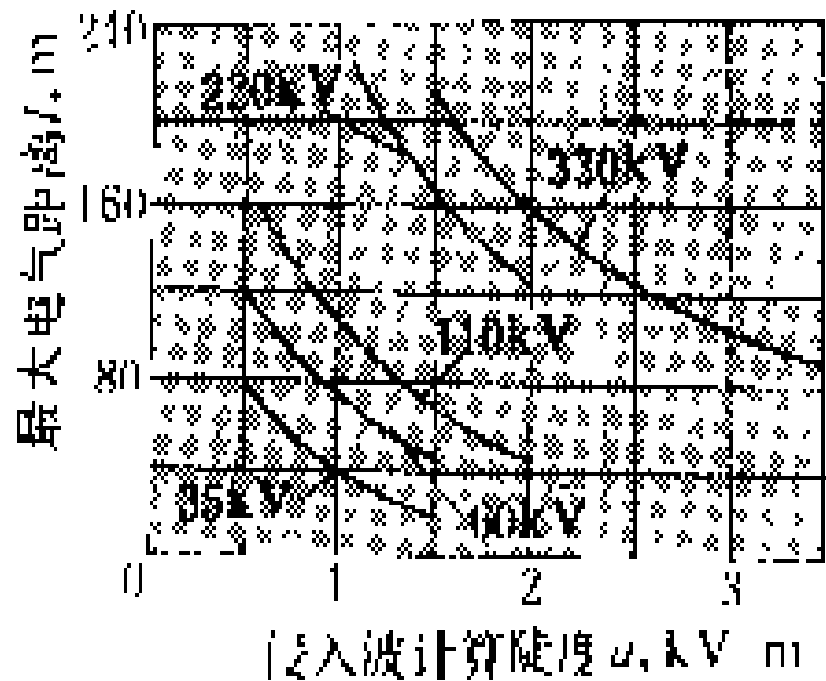


图4 一路进线的变电所中，避雷器与变压器的最大电气距离与侵入波计算陡度的关系曲线

变电所侵入波计算陡度 (kV/m)

额定电压 (kV)	侵入波计算陡度	
	1 km 进线段	2 km 进线段或全线有避雷线
35	1.0	0.5
60	1.1	0.6
110	1.5	0.75
154	—	1.0
220	—	1.5
330	—	2.2

注：长度在1~2 km之间的进线段，计算陡度可用补插法确定。

自耦变压器除有高、中压自耦绕组外，一般还带有三角形接线的低压(第三)非自耦绕组，因此可能高、低压绕组长期运行而中压侧开路，也可能中、低压绕组长期运行而高压侧开路。在这种情况下，除按三绕组

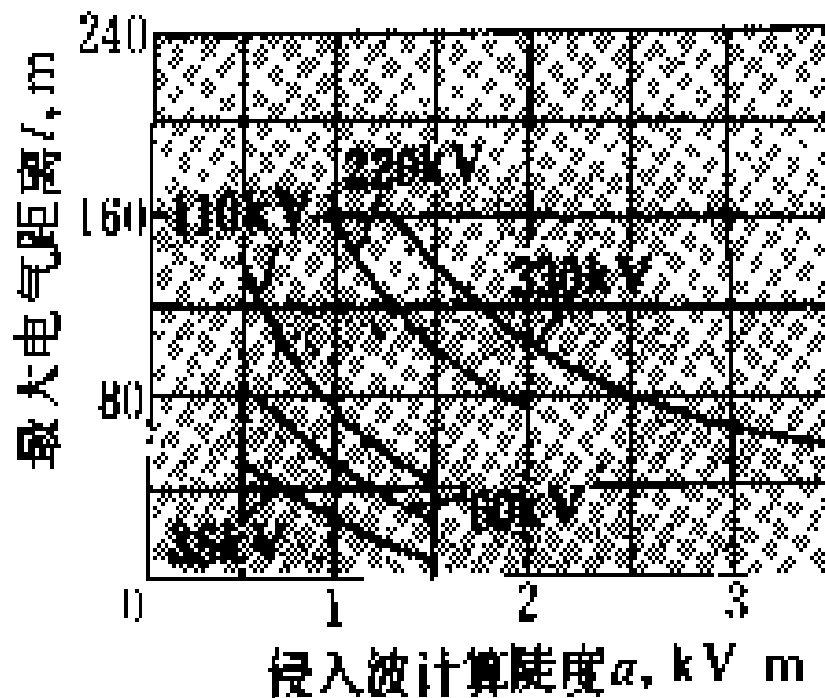


图5 两路进线的变电所中，避雷器与变压器的最大电气距离与侵入波计算陡度的关系曲线

变压器，又可使高、低压绕组受到可靠的保护，但布线麻烦，还需校验任一侧接地的情况下，在FZ2上所出现的最高工频电压不应超过其额定电压。

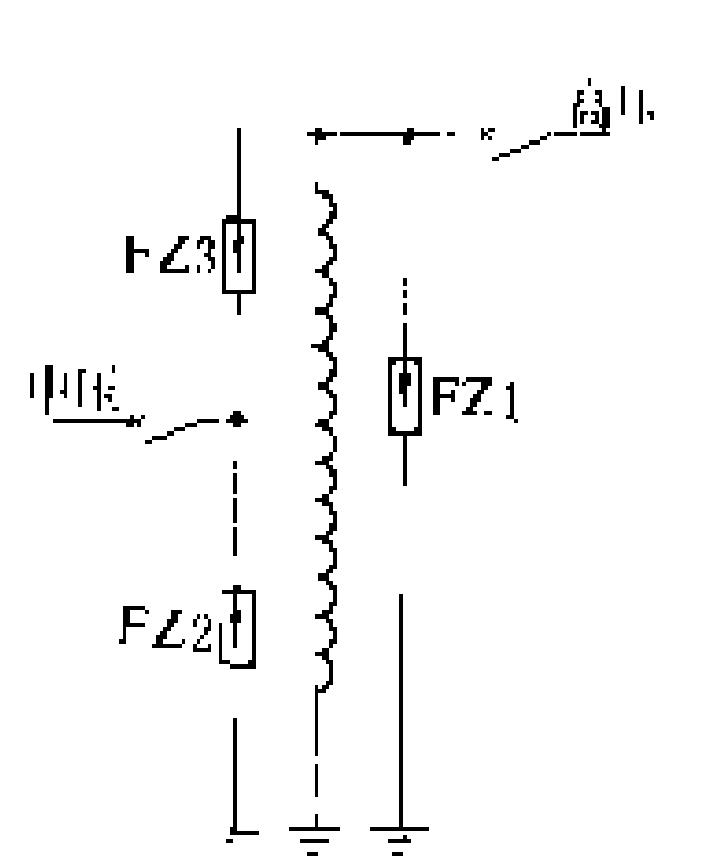


图6 自耦变压器的典型保护接线

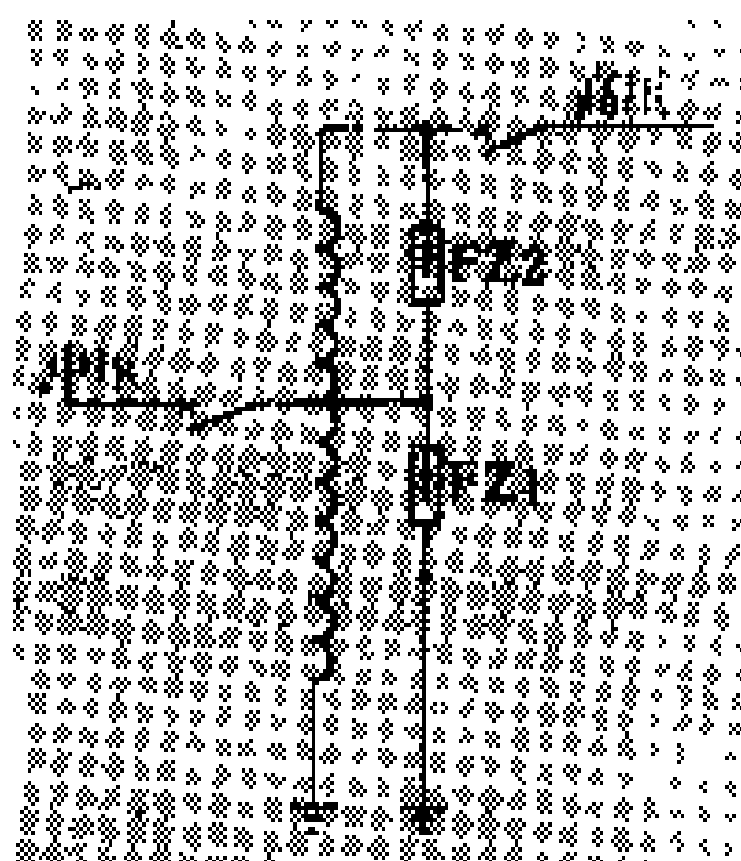
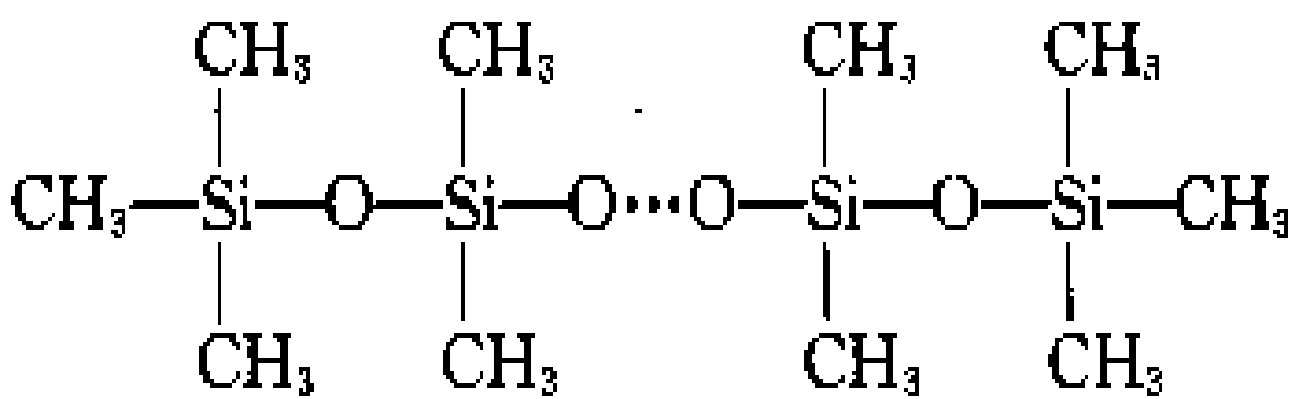


图7 自耦变压器采用综合避雷器的保护接线 (徐士珩)

变电所防污涂剂 (anti-pollution coating for substation) 利用涂剂的憎水性或包容污秽物的特点，使变电所中电气设备表面在潮湿气象条件下不致形成连续的水膜，而呈现互相隔离的水珠，从而减少电力设备表面的泄漏电流，达到提高污闪电压和防止污闪的目的。常用的防污涂剂有硅油、硅脂和蜡类涂剂等。近年来一些新的合成材料涂剂如硅橡胶、长效硅蜡等已在进行研究试验，并取得了一定的成果。

硅油 应用较为广泛的一种防污涂剂，它属于有机合成的高分子化合物，由以Si—O为骨络的链状分子所组成。常用的二甲基硅油的分子链结构为



在硅的上下两侧对称排列有二甲基，分子的两端则为三甲基。Si—O链数的多少表示分子量的大小，也反映粘度的大小。Si—O链是极性链，当将其涂于瓷件表面



时，其中的 O 即定向于瓷件表面，而非极性的甲基则对称排列在外侧，形成憎水性的保护膜。

**硅油** 的有效期与其粘度有关，粘度的大小将决定涂层的厚度，因而影响有效期的长短。常用粘度为 2000~3000 cst 的二甲基硅油，它的有效期为 4~6 个月，但在以天然气为原料或燃料的化工污秽地区，其有效性将明显下降。在硅油涂剂有效期结束时，只要用布擦拭就可将涂层擦净，对清除水泥等一些粘结性污秽物十分方便。

**硅脂** 将二氧化硅粉用三甲基氯硅烷加以处理，使亲水的 Si—OH 变成憎水的 Si—O—Si(OH)<sub>3</sub>。将这种处理过的二氧化硅粉加入硅油中形成糊状的硅脂，以便于控制涂层的厚度。它的有效期可达一年或更长，但在有纤维性污秽的地区，硅脂的有效期将受到影响。

**蜡类涂剂** 中国有些地区采用以地蜡和凡士林为原料的碳氢系涂料。这种蜡类涂料资源丰富，价格较便宜。蜡类涂剂的成份配比要适当，使它在冬季不致冻裂，在夏季不致溶化流淌。地蜡与凡士林的配比一般为 1:(1.2~1.5)，其比例与原料种类和地区的气候条件有关。使用时将原料加温溶化并均匀混合，然后将绝缘子等瓷件浸入，取出后其表面即可均匀地覆盖一层蜡类涂层。蜡类涂剂的有效期一般为 3~5 年，如果处理时工艺不良，有效期将受到影响。

(徐通训)

brandiansuo fangwuxing jueyuanzi

**变电所防污型绝缘子** (anti-pollution type insulators of substation) 见绝缘子。

brandiansuo fuzhu sheshi

**变电所辅助设施** (auxiliary facilities of substation) 变电所内除了主变压器、配电装置、主控制楼以及同步调相机间以外的其它生产性设施的总称。一般包括电气设备检修间、油处理设施、储油设施以及空气压缩系统。在 220 kV 及以下的变电所中，一般不单独设置辅助设施，而将它们集中在供电部门内，统一使用。只有在 330~500 kV 枢纽变电所中才考虑单独设置辅助设施。

**电气设备检修间** 330~500 kV 变电所内通常设置两级电压的屋外配电装置，安装有断路器、隔离开关、电压互感器和电流互感器等大量的高压电气设备，一般都需要设置电气设备检修间，对高压电气设备就地进行定期维护和检修。电气设备检修间按照检修断路器、隔离开关等电气设备进行设计，不考虑检修变压器。中国 1980 年以后建成的第一批 500 kV 变电所内都设置了专门的变压器检修间，但是由于 500 kV 变

压器体积和重量都很大，从变压器油池搬运到变压器检修间很困难，同时检修间也不具备变压器制造厂内净化车间的工艺条件，所以变压器发生重大缺陷时，通常是返厂检修。因此在后来设计的 500 kV 变电所内一般都不设专用的变压器检修间。

电气设备检修间通常由检修大厅、干燥间和绝缘件间三部分组成。检修大厅供检修和组装高大的 500 kV 电气设备用。大厅内设置桥式起重机，起重机的起吊重量按起吊最重的 500 kV 充油式电流互感器考虑，起重机吊钩的对地高度按起吊最长的 500 kV 电容式套管考虑。干燥间供电气设备绕组和绝缘材料干燥用，其尺寸按干燥材料的体积考虑。绝缘件间用来存放绝缘材料并兼作六氟化硫断路器消弧室小修之用。绝缘件间要求较高，一般都设置双层门窗并加密封，防止尘土进入，采用水磨石地面，保持车间的干净和清洁。

**油处理设施** 对绝缘油进行过滤、干燥等各种工艺处理的设施。变电所内的充油电气设备可分成两类：①油量很多的变压器和并联电抗器，一般为数十吨油。②油量较少的少油断路器、电流互感器、电压互感器和耦合电容器，只有数吨油。由于两类充油电气设备对油的含水量、含气量、耐电强度和介质损耗等各种工艺指标的要求不同，故通常采用不同的油处理循环。

大油量电气设备采用绝缘油→绝缘油箱→真空滤油机→变压器或并联电抗器的循环系统。真空滤油机的出力较大，一般可达到 4500 l/h，它具有二级精过滤器，同时起到过滤、干燥、抽真空等几种作用。绝缘油箱的容积取决于最大一台充油电气设备的含油量，并考虑在变电所现场倒换油等因素。油量较少的电气设备采用绝缘油→绝缘油箱→压榨式滤油机→硅胶过滤器→电气设备的循环系统。压榨式滤油机的出力较小，是真空滤油机的 1/3 左右，精度也差，需要加装单独的硅胶过滤器，对油进行干燥处理。两种油处理循环系统的油质相差较大，不允许混油，要求采用单独的绝缘油箱。

油循环设备的布置方式有固定式和活动式两种。固定式布置方式是将滤油机固定布置在油处理室内，绝缘油箱布置在户外露天油库，它们之间采用固定管道连接。通常为了方便运行，在油处理室旁边还设置油分析室和天平室，在变电所内进行油的分析化验。20 世纪 80 年代，中国第一批 500 kV 变电所的油循环设施多数采用固定式布置方式。变电所的油处理设施使用率不高，采用固定式布置方式，管道较多，长期不用年久失修，使用时还要对管道进行清洗，工作量较大，故已不再采用。活动式布置方式是将滤油机和绝缘油箱都采用活动安装方式，集中存放在供电部门。在主变压器和其它电气设备的附近设置活动式绝缘油箱的基

础。当进行油处理时，将油处理设备运到充油设备附近，各设备之间敷设临时连接管道。活动式布置方式连接管道短，安装方式灵活，目前采用较多。

**储油设施** 储存油的一种装置。分固定式和活动式两种：①固定式。将绝缘油箱固定安装在户外基础上，在油箱之间设置固定连接管道，在绝缘油箱四周设置挡油设施。固定式绝缘油箱通常布置在油处理室附近，离高压配电装置较远。②活动式。只在高压配电装置附近设置活动绝缘油箱的基础，平时没有绝缘油箱，进行油处理时才将绝缘油箱运到现场。绝缘油箱四周不设任何挡油设施，通常它离充油设备比较近，敷设临时管道比较短，使用较方便，故采用较多。

(蓝增珏)

biandiansuo jishu jingji zhibiao

**变电所技术经济指标** (technical & economical indexes of substations) 变电所工程设计中衡量其技术经济效果的概括性数字，用以作宏观比较、概括估计和投资分析。

变电所技术经济首先取决于输电系统方案的优化和电力网的合理布局，表现在输电与配电的协调发展，上下级电压的配合恰当，以及电力网规划中变电所的数量和位置选择等方面，使设计中的变电所在下一级电压网络中能发挥中枢和支撑作用。同时，变电所规划容量与本期设计容量的确定、主变压器的选择、配电间隔数量的研究和补偿装置的要求，都对变电所工程的技术经济性起主导作用。此外，变电所建设的外部条件、所内建筑物面积和标准等，也影响变电所的技术经济指标。

通过电力网可行性研究，对建设项目的计划任务作出决策，并确定工程建设规模之后，变电所工程本身的技术经济性可以用变电所建设总投资、单位容量投资、配电间隔投资、补偿装置投资、通信设施投资、所区占地面积指标、场地利用系数以及建筑系数等指标表示。

**变电所建设总投资** 变电所建设的综合投资费用。总投资的工程性质构成包括主要生产工程建设投资、辅助生产工程建设投资、生活福利工程建设投资、场地准备费用投资、生产准备费用投资和其它工程及费用投资。总投资的费用性质构成包括建筑工程费用投资、设备购置费用投资、安装工程费用投资和其它费用投资。从投资构成上对总投资进行分析，其目的是研究各项投资分配比例的合理性，并掌握其经济规律。

**变电所建设单位容量投资** 衡量变电所工程造价经济合理性的主要指标之一。单位容量投资是指变电所工程每千伏安建设的综合投资。

单位容量投资 [元/ (kV · A)]

$$= \frac{\text{变电所工程建设总投资 (元)}}{\text{变电所设计容量 (kV · A)}}$$

变电所建筑与安装工程造价计算，包括各自工程的直接费、其它直接费、间接费、计划利润和税金。

**不同电压的配电间隔投资** 包括设备购置费用、建筑工程费用、安装工程费用和其他有关费用的投资。配电间隔投资指标用于分析、研究和考核其投资比例的合理性。

**补偿装置的投资** 包括设备购置费用、建筑工程费用、安装工程费用和其他有关费用的投资。补偿装置的投资指标用于分析、研究和考核其投资比例的合理性。

**通信设施的投资** 包括设备购置费用、建筑工程费用、安装工程费用和其他有关费用。通信装置的投资指标用于分析、研究和考核其投资比例的合理性。

**所区占地面积指标** 主要是指单位容量占地面积。

单位容量占地面积 [m<sup>2</sup>/ (kV · A)]

$$= \frac{\text{变电所围墙内占地面积 (m}^2\text{)}}{\text{变电所容量 (kV · A)}}$$

**场地利用系数** 考核土地利用合理性的重要指标。

$$\text{场地利用系数 (\%)} = \frac{\text{变电所内建筑物、构筑物、道路及地上地下管线用地面积 (m}^2\text{)}}{\text{变电所围墙内的占地面积 (m}^2\text{)}}$$

**建筑系数** 也是考核土地利用合理性的重要因素。

建筑系数 (%)

$$= \frac{\text{变电所内建筑物及构筑物的面积 (m}^2\text{)}}{\text{变电所围墙内的占地面积 (m}^2\text{)}}$$

(沈长荣)

biandiansuo jidian baohu

**变电所继电保护** (relay protection in substation) 装置在变电所内的为保证电力系统和

电力设备以及设施的安全运行，检测故障和异常情况，并发出信号或跳开断路器的命令以隔离故障设备或终止异常运行的组合装置。它包括电力系统整套继电保护中需要安装在变电所内的继电保护装置以及变电所内的电力设备本身的继电保护装置。

变电所中的线路、电力变压器、同步调相机、串联补偿电容器组、并联电抗器及母线设备等，都需要配置可靠的、有选择性、动作迅速和灵敏度高的继电保护装置。为了和继电保护配合运行，提高继电保护的使用效果，变电所中还配置有自动重合闸、备用电源自

动投入装置、故障录波器、自动减负荷装置和远方断开机组等安全自动装置。根据电力系统要求和设备的重要性，继电保护通常分为电流保护、电压保护、差动保护、距离保护、高频保护、微波保护和行波保护等，同时广泛采用零序电流和电压滤过器、负序电流和电压滤过器及非线性元件组成保护。保护装置可以由电磁继电器、整流型继电器、半导体元件、集成元件或微机构成。继电保护装置及其辅助设备以及相应的二次回路构成了一个变电所内完整的继电保护系统。

对变电所继电保护的主要要求是：①变电所线路及设备的保护是在电力系统继电保护的统一规划下，力求做到可靠与合理。例如线路高频保护需考虑对侧保护的通道和频率的配合；主变压器的零序电流保护与线路的零序电流保护相配合等。②一个变电所内的设备应尽可能一致，以减少备品备件，并便于调试和检修。③尽量减少每台设备保护装置的套数及每套保护中继电器数量。④不考虑在实际运行中很少可能发生的故障和异常工作状态。

变电所中继电保护和安全自动装置通常布置在主控制室内。当 330~500 kV 配电装置中线路较多且离主控制室较远时，继电保护和安全自动装置也可以布置在靠近配电装置的继电器室内。对 110 kV 以下屋内配电装置，也可以布置在配电装置室内。

(卓乐友)

biandiansuo jiedi zhuangzhi

**变电所接地装置** (grounding installation in substation) 变电所内电气设备接地设施的总称。包括埋入地下直接与大地接触的金属导体(称接地体或接地网)、电气设备的接地部分与接地体连接用的金属导体(称接地线)。接地装置是保证变电所内人身和电气设备安全的重要设施。

**接地范围** 变电所中电气设备的下列金属部分均需接地：①变压器、电器、电机和照明器具等的底座和外壳；②设备的传动装置；③互感器的二次绕组；④配电屏与控制屏的框架；⑤配电装置的金属架构和钢筋混凝土架构以及靠近带电部分的金属围栏和金属门；⑥电力电缆的电缆接头、电缆终端的外壳以及电缆的外皮和钢管电缆的钢管等；⑦控制电缆的外皮；⑧避雷器、保护间隙和避雷针的接地端。

**接地装置** 变电所内的接地装置，除了要充分利用自然接地体外，还需装设人工接地网。为了降低接触电势和跨步电势，人工接地网做成闭合形，并在接地网内装设若干均压带。对大面积接地网，降低接地电阻主要依靠以水平接地体为主的人工接地网，它能使电压均匀，减小接触电势和跨步电势，而且还有散

流作用。而垂直接地体主要用作避雷针和避雷器的集中接地，加强散泄雷电流的作用。

变电所的接地网需满足接地电阻的要求。由于接地网的边角外部电位梯度较高，所以接地网的外缘要求连成闭合形，外缘的各角做成圆弧形，圆弧的半径不小于均压带间距值的一半。接地网的埋设深度通常为 0.6 m。

在接地网边缘经常有人出入的走道处，敷设帽檐式均压带来降低接触电势和跨步电势。在走道处铺设沥青地面或砾石地面也能降低接触电势和跨步电势。当人工接地网其他局部地方的接触电势和跨步电势超过规定值时，除采用铺设沥青地面或砾石地面的措施外，有时局部增设水平均压带或垂直接地体。增设水平均压带时可以直接降低地表面的电位梯度，增设垂直接地体时是用提高地表面电阻率的方法来降低人身可能承受的电压，但这时接地网上的电位梯度并不改变。

在人工接地网中，水平敷设的接地体采用圆钢或扁钢，垂直敷设的接地体可以采用角钢或圆钢。

**避雷针和避雷器的接地** 独立避雷针的接地装置与接地网的地中距离要求不小于 3 m，如在布置上有困难，可以采用沥青或沥青混凝土作为绝缘隔离层。配电装置构架上的避雷针要求与接地网相连，并在其附近装设集中接地装置。从避雷针与接地网连接处到变压器或 35 kV 及以下设备与接地网连接处的接地体长度不能小于 15 m。独立避雷针及其接地装置与道路或建筑物出入口的距离要求大于 3 m，否则需采取均压措施，或铺设沥青、砾石、卵石路面。避雷器要求以最短的接地体与接地网连接，并在连接处附近装设集中接地装置。

**工频高电位的防止措施** 在大接地短路电流系统中，高土壤电阻率地区的变电所的接地装置，当接地电阻不符合要求时，需采取以下防止工频高电位的措施：①对可能将接地网的高电位引向变电所外、或将低电位引入变电所内的设施采取隔离措施。如在对外的通信设备上加隔离变压器、向外供电的低压线路采用架空线并将其电源中性点改在用电处接地、通向变电所外的管道采用绝缘段、铁路轨道分别在两处加绝缘鱼尾板等。②接地网的电位升高时，计入短路电流非周期分量的影响，以免造成变电所内的 3~10 kV 阀式避雷器动作或爆炸。③设计接地网时，验算接触电势和跨步电势，施工后进行测量，并绘制电位分布曲线。

**降低接地电阻的措施** 根据变电所的具体情况采取以下措施：①尽量将接地装置与架空线路的避雷线相连，能降低变电所总的接地电阻。如避雷线属于不



允许与变电所配电装置架构直接连接的范围,则变电所接地网在地下与避雷线的接地装置连接,连接线埋在地中的长度不小于15 m。②如在电气设备附近1 km以内有低电阻率的土壤,则敷设引外接地体降低变电所内的接地电阻。③如地下深处的土壤电阻率较低,则用深埋式接地体。④填充电阻率较低的物质,如中国使用的长效降阻剂。

见接地装置。

(李昌龄)

biandiansuo shebei xuanze

## 变电所设备选择 (selection of equipments in substation)

变电所的主变压器、断路器、隔离开关和限流电抗器等电气设备的选择条件主要是:①变电所所在地区的环境使用条件;②设备的基本技术要求;③额定参数满足正常运行和故障条件的工作要求。此外,在进行设备选型时还应考虑工程的具体情况和要求。

**环境使用条件** 包括海拔高度、环境温度、风速、相对湿度、地震基本烈度、覆冰、日温差和外绝缘的爬电比距等。

**海拔高度** 电气设备通常是按使用于海拔高度不超过1000 m条件考虑的,当海拔高度超过1000 m时,将因气压低、气温低、日温差大和日照强等因素而影响电气设备的外绝缘、温升和灭弧能力等。一般情况下,气温降低可抵消温升的影响,因此电气设备的额定电流值与海拔高度变化的关系不大。对海拔高度超过1000 m的地区,需选用适应相应海拔高度的电气设备,或选用外绝缘高一级的设备。

**环境温度** 电气设备的环境温度是影响其输出容量、使用寿命和性能的一个因素。对屋外设备规定的最高和最低环境温度取年最高为最低温度,该温度为一年中所测得最高与最低温度的多年平均值。对屋内设备规定的最高环境温度取通风设计温度或最热月平均最高温度加5℃,该温度为最热月每日最高温度的月平均值,且为多年平均值。屋内最低环境温度,在冬季无采暖设施的地区,按屋外环境温度降低10℃考虑,在严寒地区则按-25℃考虑。

**风速** 选择电气设备时所用的最大风速可以取离地10 m高处、30年一遇、10 min平均最大风速。电气设备一般可以在风速不大于35 m/s的环境中使用。在最大风速超过35 m/s的地方,需在屋外配电装置的布置中采取措施,如降低安装高度、加强基础固定等。

**相对湿度** 一般情况下,当相对湿度大于80%时,电气设备的绝缘性能会下降,金属部件会发生锈蚀,甚至影响设备的可靠运行。选择设备时,通常采用

当地相对湿度最高月份的平均相对湿度。在中国,要求日平均相对湿度值不大于95%,月平均相对湿度值不大于90%。

**地震基本烈度** 选择电气设备时,需根据当地地震条件选用符合要求的产品。地震对电气设备的影响主要是地震波的频率和地震振动的加速度,其中危害最大的是水平加速度。工程中按所在地区的地震基本烈度选用能够满足地震要求的产品。一般情况下,地震基本烈度为7度及以下地区的电气设备可以不采取防震措施,在7度以上地区需采取措施使电气设备能承受地震力。在地震基本烈度为8度和9度的地震区,其地面水平加速度分别为0.2g和0.4g, g为重力加速度。

**覆冰** 在积雪和覆冰严重的地区,需防止冰串引起瓷件绝缘对地闪络和隔离开关的动作。中国隔离开关的破冰厚度为10 mm。在重冰区中,所选用隔离开关的破冰厚度需大于最大覆冰厚度。

**日温差** 指气象台百叶窗中所记录的每日最高和最低温度的变化范围。当日温差大时,对压缩空气的干燥度将有更高的要求,还影响瓷套的绝缘,使密封件的密封性能变差,使设备发生漏气或漏油问题。国际上对可靠性试验中的日温差按25℃考虑,此日温差值也适用于中国的主要工业用电地区。

**外绝缘爬电比距** 爬电比距是电气设备外绝缘表面爬电距离与设备最高电压之比,其值与外绝缘污秽等级及电力系统中性点接地方式有关。选择设备时按所在地具体情况进行相应爬电比距的产品。

**基本技术要求** 包括电晕及无线电干扰、噪声、局部放电、工频过电压等方面的要求。

**电晕及无线电干扰** 无线电干扰主要来自电气设备的电压、电流突变和电晕放电,它会增加设备的电晕损耗和影响电子设备的正常运行。因此,要求电气设备在1.1倍最高工作电压下,晴天的夜晚不出现可见电晕。110 kV及以上电气设备户外晴天无线电干扰电压不大于2500 μV,但对110 kV以下电气设备,通常可以不校验无线电干扰电压。

**噪声** 噪声会对运行人员和附近居民造成影响。在变电所内主要是控制断路器、变压器和电抗器的噪声水平。断路器在正常运行中噪声很小,但操作时噪声很大,因而要控制操作时的非连续性噪声水平。变压器和电抗器的冷却风扇和铁芯振动在运行中会产生噪声,故需控制运行中的连续性噪声。

**局部放电** 电气设备绝缘介质中的放电。长期局部放电会使绝缘介质老化,引起绝缘事故,故需对局部放电加以限制,以保证电气设备安全运行。在中国,500 kV变压器在1.5倍相电压工作时,绕组的允许局部放

电量为 500 pC; 500 kV 电抗器绕组的允许局部放电量也为 500 pC; 500 kV 电容式电压互感器和电容器在 1.1 倍相电压工作时, 绕组的允许局部放电量 10 pC。

**工频过电压** 当变压器磁通密度较高出现工频过电压时, 铁芯很容易饱和, 使励磁电流增加, 其中还含有高次谐波, 引起绕组和铁芯附件发热。此外, 工频过电压对断路器的绝缘和避雷器的动作负载特性等都有影响。这些问题对 500kV 电气设备尤为突出。中国 500 kV 变压器允许短时工频过电压(设备最高工作电压的倍数) 及其持续时间见表。

500 kV 变压器允许短时工频过电压及其持续时间

工作状态 过电压 倍数及允许时间	满 载		空 载		
	1.05	1.4	1.1	1.2	1.3
过电压倍数	连续	5s	连续	30 min	1 min
允许时间	连续	5s	连续	30 min	1 min

**额定参数** 包括额定电压、额定绝缘水平、额定电流、额定热稳定电流、额定热稳定时间及动稳定电流等。

**额定电压** 电气设备的额定电压与安装地点电力网的额定电压一致。在某些特殊情况下, 如高海拔地区或需操作大容量并联电容器组而又选不出合适的断路器时, 有时选用比电力网额定电压高一级额定电压的断路器。

**额定绝缘水平** 电气设备的绝缘水平按电力网中可能出现的各种作用电压、保护装置特性及设备的绝缘特性等因素来确定, 以使设备绝缘故障率或停电故障率降低到在经济上和运行上均为合理的水平。

**额定电流** 电气设备的额定电流等于或大于在运行中可能出现的各种负荷电流。对于户外隔离开关, 因其触头暴露在露天, 长期运行以后, 触头会发生氧化或受污秽影响, 使触头温升偏高, 所以其额定电流值通常留有适当的裕度。

**额定热稳定电流及额定热稳定时间** 额定热稳定电流是在规定使用条件和性能条件下, 并在规定的短时间内, 电气设备(断路器和隔离开关等)在合闸位置时所能承受的电流。热稳定时间决定于后备保护的整定时间。330 kV 及以下电气设备的额定热稳定时间通常取 4 s, 500 kV 及以上电气设备则取 3 s。这是考虑发电厂出口线路发生短路, 来自电力网的短路电流由后备保护在 2s 内已被开断, 而来自发电机的短路电流虽然后备保护动作时间长达 5~6 s, 但在 2 s 以后通过断路器的短路电流已小于额定开断电流值。同时, 断路器的尺寸大小在制造上主要取决于机械作用力和额

定电流长期通过时的温升, 而一般产品在 3~4 s 短时发热试验中均能满足要求。

**动稳定电流** 电气设备的动稳定电流等于或大于安装地点可能通过的最大短路电流峰值。动稳定电流一般为热稳定电流周期分量起始有效值的 2.5 倍。

参考书目

水利电力部电力规划设计院与水利水电规划设计院编, 导体和电器选择设计技术规定, 北京: 水利电力出版社, 1987

(叶景星)

bliandiansuo suozhi

**变电所所址** (site of substation) 变电所的建设地点。它与变电所建设和运行有密切的关系。变电所所址需根据远期 10~20 年的电力发展规划和近期 5~10 年的电力系统设计, 确定变电所在电力系统中的性质、作用和地理位置, 然后再经过全面技术经济比较后择优确定具体所址。

**基本要求** 主要有节约用地、靠近负荷中心、地形地质条件、线路走廊、交通运输条件、水源、避开污秽地区等方面的要求。

**节约用地** 变电所所址需尽量利用荒地、劣地, 要求不占或少占耕地。在技术经济比较中, 需考虑土地使用费和安置丧失土地的农业劳动力等因素。

**靠近电力负荷中心** 这样可以减少输电线路投资和电能的损耗, 但对枢纽变电所, 除靠近负荷中心外, 还需满足电力系统的其他要求。

**良好的地形、地质条件** 主要内容有: ①所址要有便于扩建的条件, 且坡度不大于 8%, 否则需采取局部平整措施或采用阶梯式布置等; ②能满足大型设备运输要求, 并便于与外部公路连接; ③避开泥石流、危岩和易发生滚石的地段; ④能避开活断层地带和可能发生塌陷的地区; ⑤不得占用重点保护的文化遗址, 不能建在有开采价值的矿藏之上; ⑥在地震区避开断层和可能液化的地段; ⑦所址要选在 100 年一遇(对 220 kV 及以上变电所)或 50 年一遇(对 110 kV 及以下变电所)洪水位之上。

**输电线路走廊** 确定所址时要同时考虑进线和出线的走廊, 线路走廊要与附近的城镇建设规划相协调, 并留有扩建的余地。

**交通运输** 变电所所址要尽量靠近现有的铁路、公路或通航河流, 以减少建设时的运输费用, 并方便运行和职工的生活。

**水源** 变电所所址要能满足水量和水质的要求, 取水和输水设施要求简单可靠。水量要满足生活用水、消防用水和生产用水(包括同步调相机、静止补偿装置

等的冷却用水和水冲洗用水等)。

避开污秽地区 变电所所址要避开钢铁厂、铝厂、电解铝厂、水泥厂、各类化工厂和严重盐雾地区,在确有困难时,所址应选择在主导风向上风侧,或采取有效的防污秽措施。

其他要求 变电所所址的选择尚需考虑施工电源和用水、施工场地、进线和出线对附近通信线和电台的干扰影响,并要避开易燃易爆的厂矿和仓库等。

技术经济比较项目 包括技术条件、基建费用和运行费用的比较。

技术条件项目 地形、地质、线路、走廊、交通运输、防洪与排水、水源、职工生活条件、施工用水与用电条件、地方性材料的供应等。

基建费用项目 土石方量、土地使用费和拆迁费、铁路和桥涵、公路和桥涵、取水供水设备和管线、基础和地基处理、建筑物抗震、临时道路、施工用水与用电等。

运行费用项目 材料、工资、水电费、各项损耗及折旧费等。

(梁奕荣 杨趣贤)

变电所通信

包括电力调度通信和所内通信两部分。变电所中电力调度通信是电力系统通信的一部分,所内通信只供变电所内生产与行政管理之用。

变电所与主管调度所之间,设有电力系统调度用的通信设施,其通信数量和技术要求需能满足传输电话、继电保护和数据传输的需要。调度所与直接调度的重要变电所之间,至少需有两个独立的通信通道。电力载波是一种经济可靠的通信手段,得到优先采用,通常选用复用载波机。在电力系统程控交换网设计中,凡属电力系统交换点的变电所,调度用的交换机则选程控式。如果根据电力系统通信规划和系统设计,需要在变电所中建设微波站时,其设备要求与整个通信电路一致。为了满足电力系统通信设备布置的需要,变电所内需设有通信室。

变电所内生产和行政管理通信主要靠电话交换机来进行。生产检修通信则由电话机和插孔站组成,分布在配电装置、主要设备和表盘附近,利用插孔站插入电话机进行通话。对于500 kV变电所,有时根据需要可装设20~40门的小型电话交换机。变电所与当地电话局之间的中继方式,根据变电所的规模和作用与有关部门商定。

(李昌龄)

变电所污秽测定

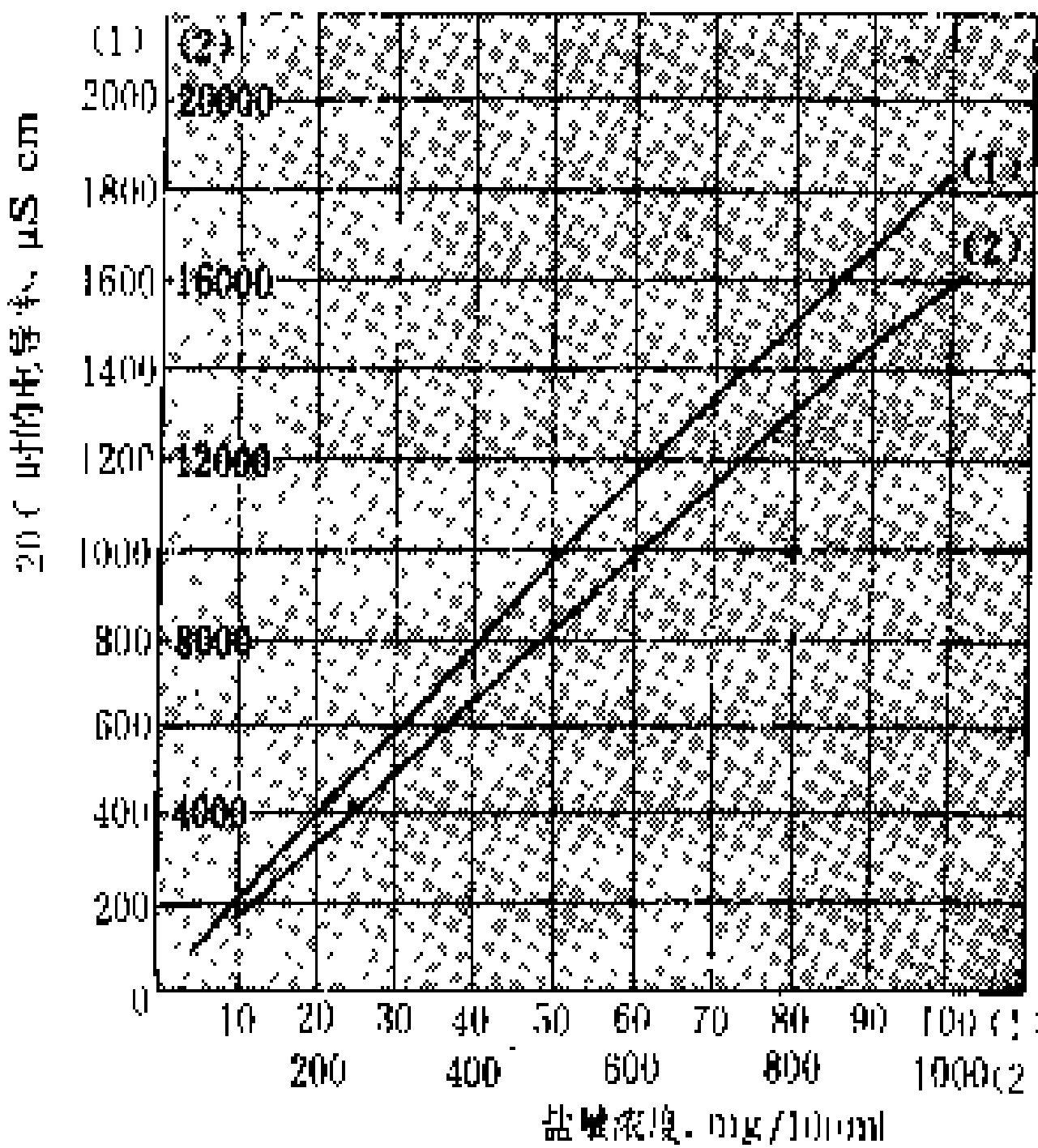
变电所电气设备上的污秽物通常包含水溶性导电介质和不溶物质两部分。水溶性导电介质通常以污秽的等值附盐密度来测定。测量的方法是:用一定量的蒸馏水将电气设备和绝缘子给定表面上的污秽物清洗下来,测量其导电率,以在同量蒸馏水中产生相同导电率的氯化钠盐量作为其等值盐量,则

等值附盐密度 = W/A, mg/cm²

式中 W 为等值盐量, mg; A 为绝缘体给定表面面积, cm²。

对于不能拆卸下来清洗污秽物的电气设备,通常采用擦拭的方法来测定,即在容器内放一定量的蒸馏水,用清洁纱布浸入适量水分将绝缘体表面上的污秽物擦洗下来。纱布的浸水量以不使水流失为度,擦洗次数以将绝缘体上的污秽物完全清洗下来为准。将擦洗后的纱布放在容器内的蒸馏水中漂洗,待纱布上的污秽物完全溶解在蒸馏水之后,此污秽溶液即可供测量之用。

目前使用的测量仪器有直读式盐量表和电导率仪两类。直读式盐量表可直接读出污秽溶液每100 ml中的等值盐量浓度(mg/100 ml),再用水量系数(实际用水量为100 ml的倍数)乘以仪表读数即可得出实际的等值盐量。用电导率仪测出溶液的电导率后,先校正到标准温度为20℃时的电导率,再查盐量浓度与电导率的关系曲线(见图)得盐量浓度,最后乘以水量系数即求得实际等值盐量。



盐量浓度与电导率的关系曲线

不溶物质的测定方法是:用已知重量的干燥滤纸将污秽溶液过滤,再将滤纸和污秽物加以干燥和称重,即可求得不可溶物质的重量。

不同类型电气设备和绝缘子的积污特性随瓷件的直径和伞形结构的不同而不同。各国的测量数据表明,直径大的瓷件的等值附盐密度较小,但是污秽闪络特性试验结果也表明直径大的瓷件所需要的爬电比距也要增大。在实际运行中,适当增加直径较大的瓷件的爬电比距,其污秽闪络次数并不比直径小的瓷件增多。

国际电工委员会(IEC)1986年出版的《绝缘子在污秽条件下的选用导则》中,介绍了五种现场的测量方法:①用定向量器收集到的污秽的体积电导率;②绝缘子表面的等值附盐密度;③不同长度的绝缘子串的闪络总次数;④样品绝缘子的表面电导;⑤运行电压下的绝缘子泄漏电流。第①、②两种方法不需要昂贵的设备,并且可以容易地完成。第③种基于闪络总次数的方法需要昂贵的试验设备。第④、⑤两种方法需要一个电源和专门的记录设备,它们具有能连续地监视污秽影响的优点。

(徐通训)

biandiansuo wuhui fenji

**变电所污秽分级** (classification of pollution in substation) 按照污秽严重程度将变电所污秽水平分成若干等级。污秽等级是选择变电所户外电气设备外绝缘水平的重要依据。污秽分级标准通常是依据自然污秽环境条件和运行经验确定的,并对不同污秽等级的变电所户外电气设备外绝缘规定出人工污秽耐受值和爬电比距,形成电气设备的污秽等级。

**自然污秽环境条件** 包括污染源特征和气象条件。污染源特征是变电所所在地区的污染源类别与性质、工矿企业的规模以及污染源距变电所的远近等。气象条件主要是风、雨、雾、露等影响绝缘表面染污及染污绝缘子闪络的各种气象因素。国际电工委员会(IEC)在IEC 815《绝缘子在污秽条件下的选用导则》中将污秽水平划分为4个等级,并列举了典型的污秽环境(见表1)。

**外绝缘污秽等级** 变电所电气设备外绝缘污秽等级主要指标是爬电比距和人工污秽耐受值。国际电工委员会在IEC815中按表1所描述的污秽水平的等级,提出了绝缘子相应的最小公称爬电比距(见表2)和人工污秽耐受值。爬电比距是电气设备外绝缘的爬电距离与设备最高电压之比,或是此爬电距离与人工污秽试验时所加的交流电压(最大相对地电压 $U_m/\sqrt{3}$ ,方均根值)的 $\sqrt{3}$ 倍之比,单位为mm/kV。

国际电工委员会在IEC815中推荐的有关污秽分级和相应的爬电比距数值,已被许多国家采用。英国、法国、苏联的国家标准采用了相同的污秽等级和爬电比数据值,德国采用了相同的污秽等级和近似(相差

表 1 污秽水平与典型环境举例 (IEC815)

污秽水平	典型环境举例
I—轻	没有工业,装供热设备的房屋密度较小的地区;工业或房屋密度较小,但经常有风和(或)雨的地区;农业地区;山区。所有这些地区,至少都离海边10~20 km,且不能直接遭受到海风的作用
II—中等	具有不产生特别污染烟灰的工业区和(或)装供热设备的房屋密度中等的地区;房屋和(或)工业密度较大,但经常有风和(或)雨的地区;会遭受海风作用但离海岸不太近(至少相隔几千米)的地区
III—重	工业密度较大地区和具有能产生污染的供热设备密度较大的城市郊区;靠近海岸的地区或是在任何情况下都会遭受到相当强的海风作用的地区
IV—很重	能遭受到导电粉尘和能产生特别厚的导电沉积物的工业烟灰作用的地区,范围适度;很接近海岸和会受到海水雾气喷溅或会受到很强的污染性海风作用的地区,范围适度;长期无雨,受到含有砂和盐的强风作用且常有凝露的地区和沙漠地区

0.6%~3.3%)的爬电比距数值。中国的国家标准GB5582《高压电力设备外绝缘污秽等级》与IEC标准相比,只多了一个0级污秽等级,其余与IEC的规定相同(见表3)。0级适用于无明显污秽地区,不需进行人工污秽试验。

**人工污秽试验** IEC 815中提出了一个按污秽水

表 2 最小公称爬电比距分级数值 (IEC815)

污秽水平	最小公称爬电比距 (mm/kV)
I—轻	16
II—中等	20
III—重	25
IV—很重	31

表 3 最小公称爬电比距分级数值 (GB5582)

污秽等级	最小公称爬电比距 (mm/kV)
0	14.8
I	16
II	20
III	25
IV	31

平确定的污秽耐受值(见表4),并说明:表中数值主要是对盘形和长棒形绝缘子说的,不能用作线路绝缘子的型式试验,也不能作为支柱绝缘子和空心绝缘子的技术要求。特别是固体层法的耐受值,可能有变动。中国国家标准分

别规定了盘形悬式绝缘子和户外棒形支柱绝缘子固体

层法的人工污秽耐受值，为产品外绝缘的型式试验项目提供实测数据。中国标准中的人工污秽耐受值与 IEC 815 中的数值有较大出入。

绝缘子外绝缘的污秽闪络特性不但与爬电比距有关，还受到绝缘子结构形状特别是伞裙或伞棱间的距离和伞裙形状的影响。根据人工污秽试验结果，在相同污秽条件下，直径大的瓷件要比直径小的瓷件需要较大的爬电比距。但在自然污秽条件下，直径较大的瓷件其积污量要比直径小的少些。IEC 推荐以平均直径小于 300 mm 为基准，爬电比距的增大系数为：直径为 300~500 mm 取 1.1，直径在 500 mm 以上取 1.2。而按人工试验结果，以 200 mm 为基准，爬电比距的增大系数为：直径 400 mm 时为 1.3，直径 600 mm 时为 1.5。

表 4 人工污秽试验相对地电压下的污秽度耐受值 (IEC815)

爬电比距 (mm/kV)	盐密度 (mg/cm²)	瓷件类型	
		污秽密度 (mg/cm²)	污秽电压等级 (kV)
16	5~14	0.03~0.06	15~20
20	14~40	0.10~0.20	24~35
25	40~112	0.30~0.60	36
31	>160	—	—

(徐通训 张大琨)

变电所污秽闪络

变电所中电气设备的瓷件和绝缘子由于表面上的污秽物所引起的绝缘闪络事故。变电所周围各种污染源排放出的污秽物沉降在电气设备瓷件和绝缘子的表面上，当它吸收了潮湿空气中的水分后，使外绝缘强度急剧下降，承受不住工作电压而发生绝缘闪络。防污秽闪络是选择变电所所址、选择电气设备型式和影响变电所安全运行的一个重要因素。

污染源 造成变电所中电气设备瓷件和绝缘子污秽闪络的污染源种类很多，化工厂、化肥厂、冶金厂、燃煤发电厂和煤烟是主要污染源，其中煤烟污源更为严重。

污秽闪络的气象条件 在各种气象条件中，雾和毛毛雨是造成污秽闪络的主要原因，雨和雪也常引起污秽闪络。如果没有这些气象条件，即使污秽情况较严重，也不致引起污秽闪络事故。

设备条件 变电所中隔离开关的瓷柱和母线支柱绝缘子的污秽闪络事故最多，断路器的套管、变压器的套管和穿墙套管次之。

变电所防污秽闪络措施 主要有：①变电所所址

尽量远离各种污源，特别是化工厂、化肥厂和冶金厂等。变电所所址要选在各种污源主导风向的上风侧。②根据变电所的污源性质和严重程度正确地确定污秽等级（见变电所污秽分级），并选择相应的绝缘子和电气设备外绝缘的爬电比距。③根据电气设备和绝缘子的绝缘水平和运行条件，采取带电水冲洗或防污涂剂等防污秽闪络措施。④在严重污秽地区采用屋内配电装置或气体绝缘金属封闭电器（GIS）。

参考书目

[苏] 阿列克山德洛夫等，高电压外绝缘的电气强度，西安高压电器研究所译，北京：电力工业出版社，1977

(徐通训)

变电所远动装置

(telecontrol equipments in substation) 电力调度中心用来对变电所实行遥控、遥信、遥测、遥调，从而实现电力系统调度自动化的一种技术装备。远动装置、远动通道、遥测变送器和执行、显示、控制等设备一起构成远动系统。远动系统的调度端和调度对象之间存在有通道，信息要加以变换和调制使之适于在通道中传递，并采取检查、保护等抗干扰措施，以保证信息传输的准确性和可靠性。电力调度中心通过远动系统收集位于数十公里、数百公里乃至上千公里之外的变电所的运行数据和工作状态，并对该变电所发送各种运行命令，从而对变电所实行遥控、遥信、遥测、遥调。

分类 按远动功能分有综合型远动装置和非综合型远动装置两类。综合型远动装置又有遥测与遥信的综合（俗称两遥）和遥测、遥信、遥控、遥调的综合（俗称四遥）的不同。非综合型远动装置主要是某些特殊遥测装置，如功率角遥测装置。按信息传递方式分有循环传递方式和问答传递方式两类。

循环传递方式 以变电所端的远动装置为主动源，它以固定的周期连续采集信息，并以自律循环方式向调度端传送。其主要优点是单程传送较快，且在一个变电所向两个或多个调度所直接发送信息（俗称一发两收或多收）的情况下，有关各调度所都可以收到所需要的信息。其主要缺点是：①调度端和每一变电所之间都需要有双工通道，只适合点对点或星形结构传送，通道利用率和组网灵活性较差；②传递的信息不论有无用处都要进行处理，这样就加重了计算机的荷载，并降低了处理效率。

问答传递方式 以调度端为主动源，变电所端的远动装置根据调度端查询命令发出信息，未收到查询命令时，远动装置处于静止状态。其主要优点是信息交



换可以采用半双工方式,适用于各种结构的通道,容易灵活组网;一般只传送变位遥信和越死区遥测,调度端只需处理要求传送的信息,减轻了计算机荷载,提高了处理效率。

**结构** 远动装置由各具有发送和接收功能的主控端装置和远方终端装置组成。由一个主控端装置对一个远方终端装置的称为1对1远动装置;由一个主控端装置对多个远方终端装置的称为1对N远动装置。装置内部一般采用模块化、组合化和总线结构。模块通常按功能划分,由基本部件和输入、输出部件构成。基本部件一般包括中央处理器、存储器、模数转换器和数模转换器、通信控制器、调制器和解调器、实时时钟以及电源部件等;输入、输出部件有模拟量、开关量、数字量和脉冲量的输入、输出等。其中,中央处理器用于管理数据流程和协调各部件的工作;存储器用于存储程序和数据;模数转换器和数模转换器用于完成模拟量到数字量或数字量到模拟量的转换;通信控制器用于对收发信息进行串-并或并-串,数码的检验和起止识别;调制器和解调器用于将数字信号进行频率或相位调制,并经滤波放大后送入传输通道,或将从传输通道接收的信号解调成数字信号;实时时钟用于接收标准时钟的同步信号进行校正,作为装置工作以及判定各种事件发生时间和顺序的时间基准。各种输入、输出部件同各种生产过程的设备接口,进行信息采集、输出控制或调整信号。这些部件由印刷电路板构成,并插装在标准的框架或机柜内,其尺寸和单元容量都是标准化和规格化的,各个变电所可以根据远动信息的内容和数量进行模块组合,以满足功能的要求。

**原理** 利用远方终端装置,对变电所的线路、变压器和母线等设备的功率、电压、电流等模拟量,开关位置状态和继电保护动作信号等的开关量,以及变压器和线路的电度脉冲量进行巡回采集,并对所采集的信息进行模数变换、位置状态检查、脉冲量累计等处理后,按照规定的通信格式(即远动通信规约)编成相应的数码序列,经调制后通过远动通道发往调度端,由调度端的主控端装置进行解调译码等处理后,供调度员使用。反之,调度端对变电所的控制和调整命令,亦经同样的过程来控制 and 调整变电所的开关和调相、调压设备。为提高信息采集、传送和处理的可靠性,远动装置采用相应的抗干扰编码技术。

**主要用途** 包括:①集中监视,提高电力系统安全经济运行水平;②集中控制,提高劳动生产率;③加强用电管理;④为电力系统调度自动化建立基础。

**集中监视** 电力系统中超高压变电所和其它枢纽变电所通常由中心调度所或大区总调度所调度,其维护和操作一般由变电所运行人员进行,这类变电所的

运行状况对整个电力系统的安全经济运行关系极大。利用远动装置可以把输电线路功率、变压器功率或电流、母线电压等运行数据和设备工作状态实时地传送到调度所,使调度员得以集中监视和分析电力系统运行情况,实施运行计划。在事故时,远动装置实时地将开关位置变化和继电保护动作等运行信号以及有关运行数据传送到调度所,使调度员得以及时了解事故发生的时间、地点和设备动作情况,从而判断其影响范围,及时采取对策。某些设备如调相、调压设备和系统解列点的断路器,还可以由调度员直接进行遥控或遥调,加速事故处理或预防事故发生。

**集中控制** 供电系统中电压在35~110 kV的大部分降压变电所和某些电压等级更高的变电所,一般采用集中维护管理,并按无人值班或留守方式运行。为确保系统可靠运行,除对全部变电所实行集中监视外,其中部分变电所由地区调度所或基地站借助远动装置实行遥控和遥调,以提高运行的灵活性和操作质量,改善劳动条件,提高劳动生产率。此外,由于集中控制,还可简化变电所的生活设施,节省用地。

**加强用电管理** 借助远动装置提供的运行数据,调度员可以直接对变电所进行负荷控制,在电力供应不足时可以有效地实行电量的计划管理。

**为电力系统调度自动化建立基础** 远动装置作为调度自动化系统的组成部分,采集变电所各种实时信息和批次信息,供计算机系统运算处理,进行制表打印、屏幕显示、越限报警和事故报警,并传送各种运行指令,起到计算机系统同变电所之间的桥梁作用,成为实现调度自动化的重要基础。当计算机系统不能工作时,在有前置机驱动模拟盘的情况下,远动装置传递的信息还能满足调度管理最基本的信息要求。

**历史、现状和发展趋势** 美、英等国家于20世纪50年代初就积极推行变电所无人值班和远动化技术。日本在60年代中期已有约60%的变电所实现无人值班。在中国,变电所远动化工作开始于50年代,当时主要着眼于35 kV变电所无人值班遥控;70年代以后,随着电力系统的扩大和电压等级的提高,变电所远动化重点放在集中监视和提高安全经济运行水平上;80年代以来,开始开展变电所集中监控、少人或无人值班。

早期变电所远动化主要采用以继电器为主要元件构成的功能简单、容量小、动作速度慢的有接点远动装置。随着无线电元件、通信和计算机技术的发展,远动装置也几经更新换代,无接点远动装置、微机远动装置先后得到发展和应用,功能也日臻完善,数据更新速度也大大加快。

为适应系统运行需要和各类变电所的不同要求,



远方终端装置需要功能多样化,即除传统的四通功能外,还兼容事件顺序记录、变电所内巡回检测等功能,且可以任意组合,由于微机技术的应用,这种装置正在发展。主控端装置与调度自动化系统的前置机系统的合并,由于1对N的远动装置的广泛应用,这种合一的制式具有明显的发展趋势。

(程鹏达)

biandiansuo yunxing weihu

**变电所运行维护** (operation and maintenance of substation) 为保证变电所设备安全可靠、达到额定出力和稳定运行而进行的经常性管理工作和特定工作。变电所运行维护的工作内容与变电所的规模、自动化水平以及值班方式等有关。

工作内容 变电所运行维护的工作内容有:①断路器和隔离开关的正常操作和故障后的操作;②电压调整装置和无功补偿设备的控制与调整;③监视电力系统的运行工况,并按调度要求做好记录;④各种设备异常运行和故障时的检查与处理;⑤各种监视、控制和保护设施的维护、检查与测试;⑥变电所内设备与环境(包括消防、排水、暖通、防污秽、绿化等)的检查、试验和清扫卫生工作。近年来,由于逐步采用气体绝缘金属封闭电器和成套变电所等,各种保护和自动化设施也逐步实现小型化和成套化,使变电所运行维护的工作量大为减少。

运行分析 对变电所中的电气设备和控制、测量、信号装置进行运行分析的内容有:①分析设备运行的有关仪表记录、试验数据、缺陷和异常情况,作出评价,并提出设备检修内容和改进意见;②分析电力潮流和电压的变化规律,进行综合归纳和数据处理,为改进电力系统运行和制订发展规划提供基础资料;③根据运行中发生的事故和故障情况,查找技术原因,分别对设备制造质量、保护装置动作情况和接线方式等作出评价,并提出对策;④根据变电所长期运行的实际情况,对变电所的设计、安装和运行工作提出改进意见。

值班方式 变电所的值班方式通常分为有人值班和无人值班两种。①有人经常值班,负责运行维护工作;②无人值班,由调度所或基地变电所远方集中控制,定期派人到变电所进行维护工作。

发展趋势 国际上正在逐步采用自动监控与数据检测系统(SCADA系统),其主机装设在调度所内,受控端装设在被控制的变电所内。它的主要功能是:①警报系统,如火警、门警、设备过热警报等;②控制与显示系统,如断路器分合、电动机起停、电压调整器调整等;③数据检测系统,如电压、电流、温度、功率、电量等数据的显示和记录,并进行各项处理;④事件顺序

系统,按预定顺序记录各事件出现的准确时间。调度所值班人员可以用SCADA系统直接操作被控制变电所的断路器、电动机、无功补偿设备和电压调整装置等,操作完成后可以收到对方发回的信号,确认操作执行情况。SCADA系统能快速反应异常情况并及时记录,为调度所值班人员的判断和处理问题提供良好的条件。随着微处理机的发展与应用,一种包括保护、控制、监测功能的整体自动化系统正在形成,这将进一步优化变电所的运行维护工作,提高供电可靠性。

见配电网调度自动化。

**参考书目**

Electric Utility Engineering Reference Book.  
Westinghouse Electric Co., 1965  
Homer M, Rustebakke editor. Electric Utility  
System and Practices, 4th ed. General Electric Co., 1983

(罗祖鉴)

biandiansuo zaosheng

**变电所噪声** (noise in substation) 变压器、电抗器、同步调相机、空气压缩装置和导线电晕等都是变电所中的主要噪声源。为使变电所中运行人员有一个安静的工作和生活环境,需对上述噪声源采取有效的治理措施。在有人值班的控制室、通信室和值班休息室等窗外1 m处的连续噪声级要求不超过55 dB(A)。如变电所附近有居民区时,其围墙处的连续噪声级要求昼间不超过65 dB(A),夜间不超过55 dB(A)。

在变电所总体布置设计中,降低噪声的主要措施有:①屋外变压器和电抗器等不与控制室和通信室平行布置,而采用错开布置方式,以避免噪声的直接影响;②改善门窗的布置位置以减轻噪声的传播影响;③加大噪声源与要求安静的建筑物之间的距离。

此外,还有以下一些措施:①在屋外变压器和电抗器周围设置隔音墙以降低噪声,但要求不妨碍变压器和电抗器的通风散热;②空气压缩装置不放在控制楼内有人值班控制室的下面,空气压缩装置的基础与建筑物的基础或墙体分离;③同步调相机布置在厂房内时,厂房结构与控制室或控制楼结构脱开,同步调相机布置在屋外时则加隔音罩;④为避免屋外配电装置中导线产生的电晕噪声,导线表面的电位梯度要求不大于30 kV/cm。

见配电变电所噪声。

(李昌龄)

biandiansuo zhao ming

**变电所照明** (lighting in substation) 变

电所内各种设施和工作处所的人工采光措施。变电所照明设计的主要内容是选择电光源和照明器、确定照度和配置照明供电网络。变电所照明分正常照明和事故照明两类，不同场所的照明方式也不相同。

**正常照明和事故照明** 正常照明是进行工作时保证产生规定的视觉条件的照明，事故照明是在正常照明中断时供继续工作或疏散人员用的照明。正常照明由自用电交流电源供电，事故照明在正常情况下由自用电交流电源供电，失去交流电源时则自动切换到直流电源供电网络中。如果变电所内装设 220 V 或 110 V 蓄电池组，则在控制室、继电保护盘室、屋内配电装置室、蓄电池室和通信室内均装设事故照明灯。

变电所控制室内正常照明和事故照明的光源都采用荧光灯，其运行方式有两种：①采用逆变器供电，正常时荧光灯由交流电源供电，逆变器处于热备用状态，当交流电源失去后，逆变器自动投入，直流电源便逆变为交流电源向荧光灯供电。②荧光灯正常工作于交流电源，通过特殊的事故照明控制装置使荧光灯能直接工作于直流电源。也有一些变电所控制室的事故照明采用白炽灯为光源，正常时白炽灯不亮，事故时能自动投入到直流电源上使白炽灯发光。有些变电所在控制室内装设一盏接在直流电源上的常明白炽灯。

**主要场所照明方式** 包括控制室、继电保护盘室、屋外配电装置、屋内配电装置、蓄电池室、通信室和变电所道路等场所的照明方式。

**控制室照明** 在有人值班变电所内，控制室内需要较高的照度、较好的亮度分布和色彩分布，在视界内没有直射眩光和反射眩光，形成有利于安全运行的明亮、柔和和舒适的工作环境。控制室照明通常采用低亮度漫射照明装置和方向性照明装置。低亮度漫射照明装置常见的有大面积栅格发光天棚和阶梯形栅格发光天棚。大面积栅格发光天棚是利用大面积低亮度漫射的发光面来获得均匀的照度，由于室内没有高亮度的发光体，故不存在直射眩光和反射眩光。阶梯形栅格发光天棚是采用半嵌入栅格灯具和分段倾斜的吊顶组成的阶梯形天棚，光通量通过栅格漫射和天棚反射，使室内得到均匀度较高的照明，并使天棚得到均匀的亮度，由于没有直射眩光和反射眩光，所以具有良好的视觉效果。方向性照明装置是沿控制盘布置带方向性配光的装置，由于它布置在盘前的有利位置，能使控制盘得到较高的垂直照度，而且不会产生反射眩光。通常采用的方向性照明装置有栅格倾斜 15° 的灯具、斜栅格灯具和倾斜安装灯具。为了使布置在反光区的灯具对仪表和监视器显示屏不产生反射眩光，一般采用由凹入式灯具或低表面亮度灯具组成的光带。在中国，以方向性照明装置为主体的发光带照明，得到较普遍的应用。在

无人值班变电所中，对控制室的照明无特别的要求。

**继电保护盘室照明** 通常采用发光带照明方式，由嵌入式开启型灯具或栅格灯具组成。

**屋外配电装置照明** 根据屋外配电装置不同布置型式，采用集中照射、分散照射或集中与分散相结合照射的照明方式。当屋外配电装置为中型或半高型布置方式时，通常采用集中照射方式，利用避雷针塔、附近的高建筑物或配电装置的构架，装设高强度气体放电灯（高压钠灯、荧光高压汞灯等）为光源的投光灯。为了能使各设备得到所需的垂直照度和灯光不被设备遮挡，通常采用双侧或多侧照射。为了能够安全地维护灯具，投光灯一般装设在专用的平台上，并且与带电部分保持足够的安全距离。采用分散照射时，则利用配电装置构架装设灯具，或采用独立的灯柱。当屋外配电装置为高型布置方式时，通常采用分散照射，灯具安装在上层操作走廊的栏杆上，以照射安装在地面上的设备。此外，在配电装置的构架上装设投光灯或路灯灯具，以照射安装在上层平台上的设备。

变压器的照明通常是在构架上装设灯具，必要时还可以装设反射型灯，以加强局部照射。

500 kV 配电装置中的相间通道通常设置安装高度低于 1.5 m 的通道照明，以便在一般照明不运行时能检查带电设备。

屋外配电装置照明采用控制室集中控制方式或就地控制的方式。

**屋内配电装置照明** 在 6~35 kV 屋内配电装置的设备小间内，均装设可以单独控制的白炽灯。在 110 kV 及以上的设备间内，除装设一般照明外，还装设反射型灯，以加强对设备的局部照明。在操作走廊和母线走廊中，通常采用荧光灯照明。

**蓄电池室照明** 蓄电池室属于有爆炸危险的场所，通常按蓄电池的类型来选择灯具型式。当采用敞开式铅酸蓄电池组时，选用防爆型灯具。当采用密闭式防酸隔爆型蓄电池组时，则选用安全型灯或隔爆荧光灯。

**通信室照明** 通信室内装设有载波机和微波机，通常有人值班进行设备管理和维修工作，对照度和照明质量有较高的要求。通常采用以荧光灯为光源的嵌入式或吸顶式栅格灯具。

**变电所道路照明** 采用以高压钠灯或荧光高压汞灯为光源的路灯，在大型变电所内通常采用光电自动控制或集中控制方式。

（汤我武）

biandiansuo zhujixian kekaoxing

**变电所主接线可靠性** ( reliability of substation bus arrangement) 衡量变电所各



电气回路连接的连续性功能的量度。变电所中各电气回路通过母线而连通。母线故障,将使所连接的各电气回路停止运行;所连接的电气回路故障,也可能累及连接于同一母线的其他无故障回路也停止运行。变电所主接线的可靠性水平,视电力系统运行要求而定,同时也受所连接的电气元件特别是断路器的可靠性所制约。

**主接线可靠性** 主要的主接线型式有:单母线接线、单母线分段接线、双母线接线、双母线分段接线、桥形接线(又分内桥与外桥两种)、多角形接线、一个半断路器接线和双断路器接线等。在连接元件较多时,为了便于断路器检修而不使电气回路停止运行,还可以设旁路母线或迂回母线等。不同型式的主接线有不同的可靠性水平。

电力系统运行对变电所主接线可靠性水平的要求尚无统一的规定。一般而言,处于电力网枢纽位置的变电所,其主接线的故障停运将对电力网运行产生严重的影响,则对其主接线可靠性要求较高;对于处于电力网末端其主接线故障对电力网运行影响不大的变电所,其主接线可靠性要求则较低。

评价主接线可靠性水平的高低,一般均从列出“不允许”事件开始,即把那些可能发生的、且一旦发生将导致严重后果的事件列为“不允许”事件。例如,全部电源进线停运,导致主变压器停运,电力网解列等等。然后,根据所选主接线型式及其倒闸操作的可能方式,按一定的规律计算出“不允许”事件发生的概率,停运的持续时间期望值等指标,从而从几种选定的主接线型式中择优。计算这些可靠性指标所用的数学方法有多种,如表格法、路径法、模糊集法、人工智能法等。这些方法各有长短,无本质差别。

计算主接线可靠性的困难在于无可用的基础数据。断路器的可靠性数据是主接线可靠性计算的关键数据,但可能得到的数据还只是故障发生率,而不是可靠性计算中所需要的故障转移率数据。

不能脱离电力网运行灵活性要求而片面追求主接线可靠性。电力网运行方式的改变,往往是通过变电所主接线的适当操作与切换实现的。不能满足电力网运行灵活性的要求,再可靠的主接线方式,也不会被采用。

**断路器可靠性** 断路器在规定的运行环境下,在预定的大修间隔时间内,接通和连续承受正常电流、开断电路正常电流以及短时承受和切断规定的非正常电流的能力量度。

断路器是在接受操作指令后进行电路开合操作的主接线元件。凡接收到操作指令而不能实现开、合电路的操作,以及未接到指令而发生电路开、合操作的事

件,均为断路器故障。在运行环境指标超过规定值而使断路器损坏的事件,虽属断路器自身能力之外,但其后果相同,亦在故障统计之列。

评价断路器可靠性的主要指标有:故障率、可用系数、平均无故障可用小时以及平均修复小时。

$$\begin{aligned} \text{故障率} &= \frac{\text{统计期间内发生故障的总次数}}{\text{统计台数} \times \text{统计年数}}, \text{次/百台} \cdot \text{年} \\ \text{可用系数} &= \frac{\text{可用小时总数}}{\text{统计期间小时数}} \times 100\% \\ \text{平均无故障可用小时} &= \frac{\text{可用小时总数}}{\text{故障总次数}}, \text{h/次} \\ \text{平均修复小时} &= \frac{\text{故障停运小时总数}}{\text{修复次数}}, \text{h/次} \end{aligned}$$

这些可靠性统计数据很难统计得齐全,特别是平均无故障可用小时与平均修复小时两项指标不易得到。

由于断路器的种类较多,要分别统计各类断路器的各自的可靠性数据则更难,即使在一个地区能做到,也因数据太少而无法处理。国际大电网会议第13专业委员会13-06工作组曾在世界范围内进行了调查,1981年提出了第一次国际调查报告,报告中涉及了22个国家、102个电力部门的近83台63kV及以上电压的断路器,按照统一规定的调查统计结果,统计的主要结论为

- (1) 故障率: 0.16~0.24 次/台·年;
- (2) 平均修复时间(不包括人为的延误): 81.6 h;
- (3) 绝大多数故障原因,是由于机械原因的占70%,是由于控制、辅助回路电气原因的占19%,是由于主、辅触头的原因的只占11%;
- (4) 断路器的设计及制造原因导致的故障占一半左右,原因不明的故障数占30%;
- (5) 操作机构及其辅助装置是故障次数最高的部件;
- (6) 对于500kV以上的断路器,其辅助触头的故障率与分合闸部件的故障率具有相同的数量级。

(费翔群)

biandiansuo zhukongzhilou

**变电所主控制楼** (control building in sub-station) 变电所监测控制中枢,且是变电所与电力网调度中心的联系纽带。在主控制楼的控制室中布置有变压器、线路、母线等主要电气设备的控制、信号、测量、保护、自动装置、变电所二次回路电源和通信设备等。主控制楼是变电所中的主要建筑物。

**主控制楼设施** 根据变电所在电力网中的作用、主变压器容量和电气设备数量等因素,设置主控制楼或单层主控制室。枢纽变电所和区域变电所通常都设

置三层式主控制楼。主控制楼的第三层为控制室和继电器室,第二层为电缆层,底层布置有蓄电池室、自用电源配电设备室、变电所内通信及电力网载波、微波通信室、值班人员休息室、电气调试室、工具储藏室及其他必要的辅助设施。在地区变电所中,配电装置的电压较低,电气设施较少,通常只设单层主控制室,其他房间则与主控制室相连布置。

主控制楼通常按变电所规划设计容量和各级电压线路规划回路数在第一期工程中一次建成。它在变电所总平面布置中的位置,需根据变电所内交通、配电装置布置及各种建筑物布置等综合考虑,要求便于运行巡视,尽量缩短控制电缆长度,噪声干扰较少,以及建筑物要有良好的朝向等。

主控制楼通常与 6~35 kV 屋内配电装置相连接。110~220 kV 屋外配电装置如为高型布置且距离较近时,可以在主控制楼与高型屋外配电装置上层操作通道之间设置连接天桥,以便运行人员对高型屋外配电装置进行巡视和事故处理。

**控制室布置** 在枢纽变电所和区域变电所中将控制屏布置在控制室内,面将继电器屏布置在相连的继电器室内。当调试继电器屏时不致影响控制室内运行人员的正常工作。控制室和继电器室的照明、暖通和建筑装饰等通常采用不同的标准,继电器室的标准一般稍低。地区变电所则将控制屏和继电器屏都布置在主控制室内,有时则利用控制屏主环分隔出一个控制小室,将继电器屏布置在主环后面。当继电器屏单独布置在一个房间内时,其布置除需紧凑外,还要满足调试和运行方便的要求,并使控制电缆短且尽量不交叉。当继电器屏和控制屏在同一房间内时,继电器屏布置在控制屏后面。与继电器屏布置在一起的还有电能表屏、远动装置屏、变送器屏等。500 kV 变电所采用双重化保护装置时,相同功能的保护不在同一屏上,屏的位置尽量分开,以便调试时互不干扰,而且当一个屏发生故障时不会影响其他屏的运行。

控制屏主环正面通常采用直列式布置或弧形布置。主变压器、母线设备和中央信号装置的控制屏均布置在主环的中央,线路、并联电抗器、串联补偿装置和并联补偿装置等控制屏可以布置在主环正面或侧面。直流屏如果在主控制室内,则布置在主环的侧面,或布置在主环外便于操作的地方。此外,继电器屏有一种能前后开门的封闭式屏,使用比较方便,相同设备的保护屏面的布置互相对应一致,并具有能观察保护装置动作的指示标志。

控制屏有屏、屏台合一或屏台分开设返回屏等不同型式。屏面布置应该便于控制和监视,屏上的模拟接线应清晰可辨。

当配电装置远离控制室时,其线路和母线设备的继电器屏、电能表屏、变送器屏等也可布置在屋内配电装置室内或屋外配电装置的继电器室内。

在变电所内设置计算机或微处理机构成的监控装置时,其主机和辅助设备布置在与主控制室相通的专用房间内,但屏幕显示器则放在值班人员操作台上。

(卓乐友)

biandiansuo zidonghua

### 变电所自动化 (automation of substation)

在有人值班的 500 kV 变电所采用微处理机以满足监控和部分管理的需要。

变电所中微处理机的功能主要有:①进行巡回监测和召唤测量。②对输入数据进行校验和软件滤波,对脉冲量进行计数,对开关量的状态进行判别,对被测量进行越限判别、功率总和、电能累计等。③彩色显示网络接线图及实时数据、计划负荷和实际负荷、潮流方向以及电压等。当开关变位时,自动显示对应的网络画面,并通过音响和闪光显示,报警并打印。还能对被测量越限情况和事故顺序记录显示。④进行报表打印,有每隔一小时打印、每天运行日志报表打印、每月典型报表打印、每月电量总加报表打印、开关状态一览表随机显示打印等。⑤具有汉字人机对话及提示功能,可随机方便地在线修改断路器和隔离开关的状态,修改工程有关系数和限值,可随机打印和显示测量数据与图形画面。如果条件允许,也可以增加一些管理功能,如定值修改、操作票制作、保护的配置方式、反事故对策、检修任务单和故障管理等。

变电所中的微处理机通常均配置屏幕显示器、事故打印机、报表打印机、输入打字机等外围设备。微处理机监测装置和变送器的电源通常由交流不停电电源装置(UPS)供电。

如果变电所运动装置的远动终端装置(RTU)具有微机系统的监控功能,就可以不另设微处理机。目前中国多数变电所的 RTU 装置不能满足全部监控功能的要求,远动装置也不能与变电所同步投产,所以多数变电所的微处理机监测装置与 RTU 各成独立系统,但它们之间的信息来源和处理功能等可以共用。

(卓乐友)

biandiansuo ziyongdian

### 变电所自用电 (home-load supply of substation)

给变电所内部各用电负荷供电的电源系统。通常由自用电变压器及其高压侧的电气设备、高压导线、低压自用电配电屏、低压配电线等组成。自用电负荷一般包括:主变压器冷却系统的负荷,深



井泵和消防水泵负荷,照明及动力负荷,断路器和隔离开关操动机构的负荷,天车、电焊及动力检修负荷,同步调相机的动力负荷(对装有同步调相机的变电所而言)。

**自用电电源** 给自用电系统供电的电源,包括工作电源和备用电源。自用电电源的设置,一般按照变电所的电压等级、规模(主要指主变压器的容量及台数)以及在电力系统中的地位等因素,分成以下两类:①对220 kV及以下变电所,通常都具有两台主变压器,变电所自用电系统需要两个工作电源,分别从两台主变压器第三绕组引接,一般不再单独设置备用电源,而是利用两个工作电源互为备用。只有在特别重要的220kV变电所内,有条件时可以从变电所外部引接第三个电源作为备用电源。②330~500 kV变电所一般都有两组或两组以上的主变压器,变电所自用电系统有两个独立的工作电源,分别从两组主变压器第三绕组引接。此外还设置一个独立的备用电源,当变电所具有第三组主变压器时,备用电源可以从它的第三绕组引接,或从变电所外部引接可靠的备用电源,一般不采用柴油发电机作为变电所备用电源。

**自用电变压器选择** 包括自用电变压器的台数、容量、阻抗、损耗、高压侧调压方式、高压和低压侧额定电压等内容。

**台数及容量** 220 kV及以下变电所的自用电变压器台数等于工作电源的数量,一般为两台。每台自用电变压器的容量按全变电所负荷再加一台调相机的负荷来选择。全变电所负荷按系数法进行统计,并按经常性负荷和间断性负荷分别统计。330~500 kV变电所的自用电变压器台数等于工作电源与备用电源的数量和,通常为三台。每台自用电变压器容量的选择方法与220kV及以下变电所的相同。

**阻抗** 220 kV及以下变电所自用电变压器的阻抗一般按正常值选择,即阻抗百分数为6%~8%。330~500 kV的主变压器第三绕组的短路电流水平较高,35 kV时可达40 kA,15.75 kV时达到100 kA。为了限制自用电变压器低压侧的短路电流水平,以满足自用电380 V配电屏允许的最大动稳定和热稳定电流的要求,往往需要选择高阻抗的自用电变压器,其阻抗百分数为10%~18%。

**损耗** 自用电变压器要求尽量采用低损耗的节能型变压器。220 kV及以下变电所,选用正常阻抗或低阻抗自用电变压器,就可以满足要求。330~500 kV变电所由于要限制短路电流水平,一般都选用高阻抗的自用电变压器,损耗较大。随着高动稳定和热稳定的380 V配电屏制造技术的不断提高,自用电变压器的阻抗会逐步降低,逐渐满足节能变压器的要求。

**高压侧调压方式** 取决于对主变压器第三绕组电压质量的要求。当主变压器第三绕组只有自用电变压器和低压出线,没有其它电压干扰源时,电压波动能够在允许范围之内,此时自用电变压器高压侧无载调压装置共有+5%、+2.5%、0、-2.5%、-5%五级电压抽头。当主变压器第三绕组除了自用电变压器、低压出线以外,还有同步调相机时,调相机在起动过程中电压波动较大。为了保证自用电低压侧母线的电压质量,则要求自用电变压器高压侧设置 $\pm 4 \times 2.5\%$ 有载调压装置,共有+10%、+7.5%、+5%、+2.5%、0、-2.5%、-5%、-7.5%、-10%九级电压抽头,其调压范围大,并具有带负荷调节电压的功能。

**高、低压侧额定电压** 自用电变压器高压侧直接从主变压器第三绕组引接,因此它的高压侧电压等于主变压器第三绕组的电压,一般为10~35 kV。自用电变压器低压侧的电压在中国均采用380 V,是带一条中性线的三相四线制系统。日本是按负荷性质和电动机的容量大小确定自用电变压器低压侧的电压,照明及小容量动力负荷采用200 V电压,插座采用100 V电压。

**自用电高、低压侧电气设备** 自用电高压侧一般都采用10~35 kV户内高压电气设备,目前都选用高压成套开关柜。220 kV及以下变电所自用电高压侧的短路电流水平一般均小于10~35 kV户内断路器的额定最大开断电流,可以按常规方法选择有关的高压电气设备。330~500 kV变电所自用电高压侧的短路电流高达40~100 kA,需要采用限流电抗器限制自用电高压侧的短路电流,按在限流电抗器后面短路的情况来选择各高压电气设备。

变电所自用电低压侧一般都采用380V低压配电屏。所需要的空气断路器、接触器、刀闸、熔断器、母线、支柱绝缘子等各种低压电气设备都安装在配电屏内。按照不同的负荷性质、容量以及配电线数量,选择各种标准配电屏。

**自用电系统接线** 自用电高压侧分别直接接入主变压器第三绕组或变电所以外的电源,自用电系统高压侧接线为单独的接线,比较简单。自用电系统低压侧接线一般都采用单母线分段接线,重要的自用电负荷采用双回路供电,即将它们分别接在两段工作母线上。220 kV及以下变电所,一般只有两台自用电变压器,分别接入不同的工作母线段,正常运行时中间的分段断路器断开运行。当一台自用电变压器故障时,继电保护动作,将故障的自用电变压器断开,同时分段断路器合闸,全部工作母线由一台无故障的自用电变压器供电。

330~500 kV变电所有三台自用电变压器,其中

两台工作,一台备用。两台工作的自用电变压器分别接入两段不同的工作母线,正常运行时分段断路器断开,两段工作母线分开运行。当任一台工作的自用电变压器故障时,继电保护动作,将故障的自用电变压器断开,备用电源自动投入装置动作,备用自用电变压器自动投入运行。全变电所的自用电系统仍然维持两台自用电变压器分别给两段工作母线供电的接线。

**自用电配电屏的布置** 220 kV 及以下变电所占地面积相对较小,布置比较紧凑,主控制楼离主变压器较近,通常将自用电低压配电屏布置在主控制楼内。330~500 kV 变电所占地面积较大,主控制楼往往远离主变压器和 330、500 kV 配电装置,其自用电低压配电屏则单独安装在自用电室内,布置在主变压器低压侧附近,使低压配电屏至各高压配电装置的距离较近,以节省动力电缆。随着变电所电压等级的提高、占地面积的增大,越来越多的变电所的自用电低压配电屏采用这种布置方案。

(蓝增旺)

bianxiangyi

**变像仪** (image converter) 以变像管为核心部件的电子高速摄影机。变像管是一种宽电子束成像器件,由光电阴极、电子光学系统和荧光屏三个基本部分组成。物镜把被拍摄物体的像成在光电阴极上,光电阴极在光的照射下放出电子,形成电子图像。电子图像被电子透镜(静电透镜或电磁透镜)聚焦在荧光屏上,再由荧光物质转变为可见图像。

变像管分静电聚焦变像管与磁聚焦变像管两种。目前使用最多的是静电聚焦变像管,它比磁聚焦变像管体积小,重量轻,功耗低,又常兼有分幅与扫描拍摄两种功能。附图作为一种通用静电聚焦变像管的结构及工作原理图,在

阳极与荧光屏之间有三对偏转板,第一对为快门板,第二对为补偿板,它们和孔径板共同形成一个高速电子快门。在扫描拍摄时,快门板预先加上偏压,电子被孔径板截断。当触发脉冲使快门板电压降为零时,光电子束即可移至孔径板小孔中

央。第三对为位移板,快门打开前位移板加有偏压,通过小孔的电子束落在荧光屏外,快门打开时,立即有对称的斜波电压加在两块位移板上,狭缝像在荧光屏上高速扫过,形成扫描图像。分幅拍摄时,快门板和补偿板由振荡器供给相位相反的正弦电压,每周光电子束可两次穿越小孔在荧光屏上成像。如给补偿板电压加一不太大的相移,两次形成的像就分别位于荧光屏中心线上下两侧。位移板上所加的是与正弦波同步的阶梯波电压,每完成一对像后图像就在水平方向移动一格,形成两排分幅照片。

变像仪的特点是拍摄速度高。由于它的工作是依靠电子束在电场或磁场作用下的运动实现电子成像的,无机械转动部分,拍摄方式、速度的控制完全由相应的电路实现,无论是分幅摄影或扫描摄影,拍摄速度都高于光学机械式相机。变像仪的分幅频率可达每秒 $10^5$ 幅,扫描拍摄时间分辨率达 0.5 ps。

变像仪的光电阴极的光谱响应,因材料及工艺而异,从红外线到可见光、紫外线及 X 射线,都有对应的敏感阴极材料。选用适当的光电阴极,可以实现波长的转换,把不可见的发光现象转变为可见的图像,这是变像仪的又一特点。同时,通过变像管内部的电子加速或像增强器,可使图像亮度增加数百万倍,从而使微弱的发光现象也能清晰地显示出来。

变像仪的读出方式,除采用普通相机直接从荧光屏上拍摄外,为得到清晰的照片,还可采用光纤而板接触照像。在配以电视摄像机、光电二极管阵列或电荷耦合器件后,图像既可用微处理机进行数据处理,也可实时显示。

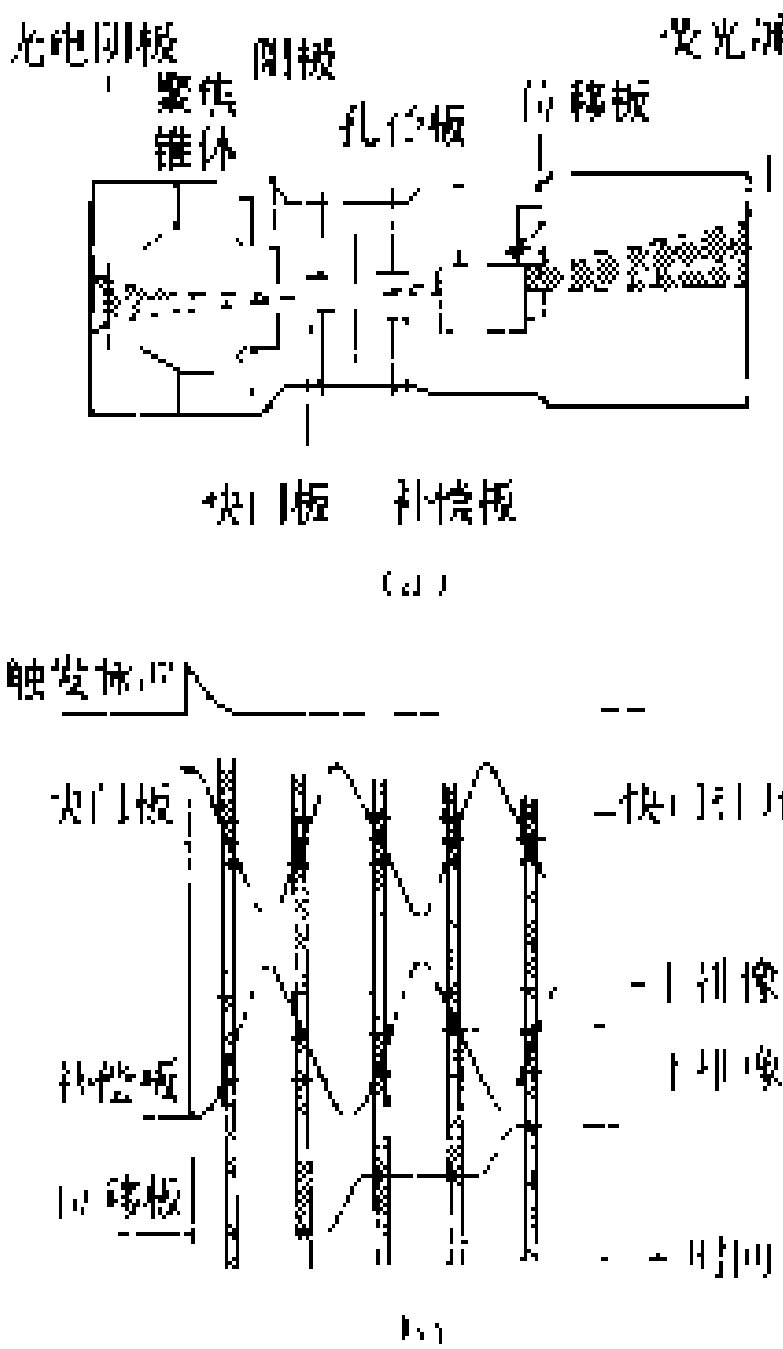
(雷经煌)

bianyaqi anzhuang

**变压器安装** (transformer installation)

对运抵安装现场的电力变压器进行技术处理使之达到投入运行条件的工作过程。变压器安装工作的具体内容取决于变压器的电压、容量、结构和运输状况。经过总装配注油后整体运输的中小型变压器,如运输中无异常情况,在作过外观检查、进行了特性测试和连接一、二次侧引线及接地线后,安装工作便告完成。而拆卸附件、注油或充气运输的大中型变压器,其安装工作则要经过检查保管、工作准备、绝缘监控、附件组装、特性试验和试运行等若干主要工序。

**检查保管** 变压器开始安装前的验收和管理工作。首先按照制造厂的发货清单核对变压器的包装数量与内容,如发现包装损坏或有异常,要仔细检查其中部件有无变形、破损、缺少、锈蚀、渗油和进水现象。记录变压器油箱内油位或充气压力以及冲击自动记录



一种通用静电变像管的结构与工作原理

器的指示数。对于一般性缺陷,经过适当维修便可恢复正常;对于影响器身或附件绝缘的问题,只有及时处理,才能防止恶性发展;对于现场难以解决的问题,要尽快通知制造厂,协商对策。以上检查无误,验收便告完成,将变压器转入保管阶段或开始安装。

变压器的附件最好在室内保管,包装底部与地面之间置放高约 100 mm 的垫木,以便保持通风,并按照包装的体积和重量以及内装附件的类别和组装顺序合理排叠,使之不易损伤,又便于取用。如高压充油套管,通常是开拆包装,竖立保管,以利于安装前发现其密封和绝缘方面的缺陷。在室外保管的器身与附件,要用帆布覆盖,栅栏围护,防止受雨水、尘土和外力的影响。为防绝缘受潮,一般都不在室外长期保管已拆卸附件保持运输状态的变压器。对于运抵安装现场的充气变压器,需尽早排气注油。对于注油的变压器,如保管时间超过三个月,则要临时装上储油柜与吸湿器,并将油位保持在正常运行的高度。

**工作准备** 保证变压器安装正常进行的前期工作。其主要内容是:①确定安装技术措施和质量要求;②准备吊装、组配和油处理等专用机具;③校正绝缘和特性测试仪表;④购置绝缘、密封、粘结、润滑和清洁材料;⑤组织施工班组;⑥布置施工现场;⑦装设电、油、气、水等供给系统;⑧处理补充绝缘油等。

**绝缘监控** 监视、控制安装过程中变压器绝缘性能的技术措施。包括绝缘保护、绝缘测试、绝缘判断和绝缘处理等内容。绝缘监控的任务就是在变压器安装过程中,使器身、附件以及油类介质的绝缘水平,不致因外界影响而明显劣化,或者将已经劣化的绝缘恢复到规定的水平。

**绝缘保护** 保护变压器的绝缘不受潮湿、污染和机械损伤。绝缘受潮通常是发生在保管、测试、注油、检查器身或组装附件而打开油箱或包装的密封使内部绝缘与大气直接接触的时候。变压器绝缘受潮,主要是由于大气中的潮湿向绝缘渗透。绝缘吸潮现象与大气的湿度以及大气与绝缘的温差有关。所以防止绝缘受潮主要是防止大气中的水分在绝缘表面凝结。通常的做法是根据大气的湿度,限定变压器器身在大气中的允许暴露时间。当大气相对湿度超过 85% 时,甚至不准许器身与大气直接接触。此外,在高湿低温状态下打开变压器油箱盖板时,通常都是将器身加热,使器身温度高于周围大气温度,或者向油箱内充注露点低于  $-30^{\circ}\text{C}$  的干燥空气。若变压器已注油,则采用器身温度高于油温、油温再高于周围大气温度的办法。在安装中还要对器身和附件用合格绝缘油进行冲洗,以清除残留的尘屑。装运补充绝缘油时,要用密封的大型容器,并使现场的储油罐和输油管保持清洁干燥。检查器身

与组装附件时,要求采用正确的施工方法和良好的机械工具,以减少绝缘的机械损伤机会。

**绝缘测试** 通常是通过检查充气油箱的残余压力、加压试验油箱的密封状况、记录器身与大气接触的时间以及环境条件和大气参数等直观检测方法,估计变压器绝缘受潮的可能性。通过绝缘油的取样试验以及绕组的绝缘电阻、吸收比、介质损耗因数测量等仪表检查方法,检查变压器绝缘有无受潮现象。

**绝缘判断** 通常是以出厂试验的变压器绝缘是合格的为前提,进行以下综合绝缘判断:①注油运输变压器的油箱无严重漏油或明显进水,充气运输变压器的箱内压力始终不低于规定值,则认为变压器在运输和保管阶段没有受潮;②变压器器身与大气直接接触的累计时间不超过规定值,或开启时间系数不大于 1,则可认为变压器在安装阶段受潮的可能性很小;③变压器取油样试验、击穿电压、含气量和含水量均符合有关标准的规定,则认为变压器没有受潮;④变压器绕组的绝缘电阻 ( $R_{60}$ ) 不低于出厂试验值的 70%,介质损耗因数 ( $\tan\delta$ ) 不大于出厂试验值的 130%,则认为变压器的总体绝缘合格,可以投入运行。

**绝缘处理** 由于潮湿是影响变压器绝缘的主要因素,所以干燥成为绝缘处理的基本方法。干燥时,要求有安全可靠的加温、排潮和监控措施,特别要防止绝缘过热引起老化和损坏。绝缘处理通常包括绝缘油处理、器身绝缘处理和附件绝缘处理三个方面。

(1)绝缘油处理:在安装现场处理变压器补充绝缘油的方法有压力过滤法、离心分离法和真空净化法等。压力过滤法用于处理受潮或污染不很严重、数量也不甚多的绝缘油;离心分离法用于处理含有较多水分的绝缘油;真空净化法用于处理严重受潮和污染且数量较多的绝缘油。实际上各种绝缘油处理方法都可以配合加热和抽真空同时进行。通过加热控制绝缘油的温度,利用抽真空控制绝缘油的压力。低粘度和负压力则能够促使油中的水分蒸发和空气排放,使油处理的效率和质量提高。

(2)器身绝缘处理:在安装现场处理变压器器身绝缘的方式有排气注油、轻度除湿和排油干燥等。排气注油用于充气运输的变压器,在真空状态下进行,对器身绝缘和绝缘油均有干燥作用。若排气注油时无条件实现真空,亦可在组装附件后补作真空或重新实施真空注油。轻度除湿适应于器身绝缘有轻微受潮的变压器,在真空状态下进行,通过热油或热风循环吸收器身绝缘中的潮湿。排油干燥用于器身绝缘严重受潮的变压器,也是在真空状态下进行,一般是利用变压器自身来取得热量,如油箱铁损法、铜损法和零序磁通法等。有时也根据安装现场的条件采用热油或热风循环,从变



压器以外取得干燥热量。

(3) 附件绝缘处理: 变压器附件如电动机、继电器等, 在运输、保管期内其绝缘亦可能受潮, 通常是将附件放在干燥箱内进行定温定时干燥。

**附件组装** 重新组合、装配因运输需要所拆卸的变压器附件。需组装的附件主要是高压套管、散热器、分接开关操作机构、储油柜、净油器、气体继电器和安全释放器等。附件组装之前, 要按规定进行检验。在油箱上组装附件的程序是: 先里后外, 先上后下, 先金属后陶瓷, 先本体后管线。组装时尽量缩短器身与大气接触的时间。工作人员进入充氮运输的变压器油箱时, 要先行排氮, 并使油箱内含氧量达到 18% 以上。

附件组装完成以后, 要尽快补充注油。由于补充绝缘油的数量不多, 一般不抽真空, 而是利用储油柜断续加油, 自然排气。补充注油结束后, 保持油的静止状态, 并定时排放聚集其中的空气, 直到无气体为止。对于隔膜密封式储油柜, 要求隔膜袋保持正常张开状态。最后要进行变压器整体严密性检查, 要求在规定的试验压力和延续时间内, 变压器各密封部位无渗漏油现象。

**特性试验** 对组装好的变压器在投运前需要进行的性能检验。除重复进行绝缘油取样试验和绕组绝缘试验外, 检验的项目有: 变压器绕组的直流电阻、极性、接线组别、变比、空载电流和空载损耗测试, 气体继电器的起动试验, 强迫油循环或外力冷却散热器的起动和运行试验, 分接开关的操作试验等。

**试运行** 将变压器接入电力系统中, 各附件置于正常运行位置, 采取递升加压或冲击加压, 先进行空载试运行, 再进行带负荷试运行或特定条件下的试运行。如果测试结果、数据显示和现象观察均无异常, 变压器的全部安装工作即告完成。

(虎骏骥)

bianyaqi baohu

## 变压器保护 (transformer protection)

反应电力变压器故障和异常运行的继电保护。按照所在电路和变压器本身输入保护装置的电气量或非电气量, 由保护装置作出判断, 并动作于信号或跳闸, 实现对变压器的保护, 以避免变压器故障进一步扩大, 减少对电力系统的影响。通常对电力变压器的下列故障及异常运行方式装设相应的保护装置: ①绕组及其引出线的相间短路和在中性点直接接地侧的单相接地短路; ②绕组的匝间短路; ③外部相间短路引起的过电流; ④中性点直接接地系统中外部接地短路引起的过电流及中性点过电压; ⑤过负荷; ⑥油面降低; ⑦变压器温度升高和冷却系统故障。此外, 对变压器油中溶解气体进行分析和判断, 也起到对变压器异常运行的监

视和保护作用。变压器保护一般可分为反应短路故障的保护和反应异常运行的保护两大类。

**反应短路故障的保护** 主要有瓦斯保护、电流速断保护、差动保护和过电流保护。

**瓦斯保护** 利用安装在变压器油箱与油枕之间的瓦斯继电器来实现, 用作反应内部故障的主要保护。瓦斯继电器是一种机械式非电气量动作的继电器, 有浮筒式和挡板式两种, 挡板式的性能优于浮筒式的。当变压器内部发生故障时, 电弧使变压器油及绝缘物分解并产生气体。轻微故障时, 气体缓慢地产生并聚集在瓦斯继电器里, 使油面下降, 瓦斯继电器的接点闭合作用于信号; 严重故障时, 油箱内气体形成强烈油流, 冲击瓦斯继电器使其接点闭合作用于跳闸, 断开变压器各侧的断路器。瓦斯保护的原理接线如图 1 所示。

**电流速断保护** 利用瞬时式电流继电器来实现, 用作反应套管或引线短路的保护。这是一种按短路电流整定其动作电流值的过电流保护。装在变压器的电源侧, 动作后断开变压器各侧的断路器。变压器的电流速断保护原理接线如图 2 所示。

图 1 变压器瓦斯保

护原理接线图

**差动保护** 利用一种以各侧电流的大小和方向为判断依据的保护装置 (差动继电器) 来实现, 用作反应变压器内部故障的主要保护。

差动保护的原理接线如图 3 所示。在变压器正常运行和外部故障时, 流入差动继电器的电流  $I_2$  和  $I_1$  大小相等, 方向相反, 继电器不动作; 当在保护范围内 (变压器内部) 发生故障时,  $I_1$  和  $I_2$  两个电流同向而使继电器动作, 断开变压器各侧的断路器。

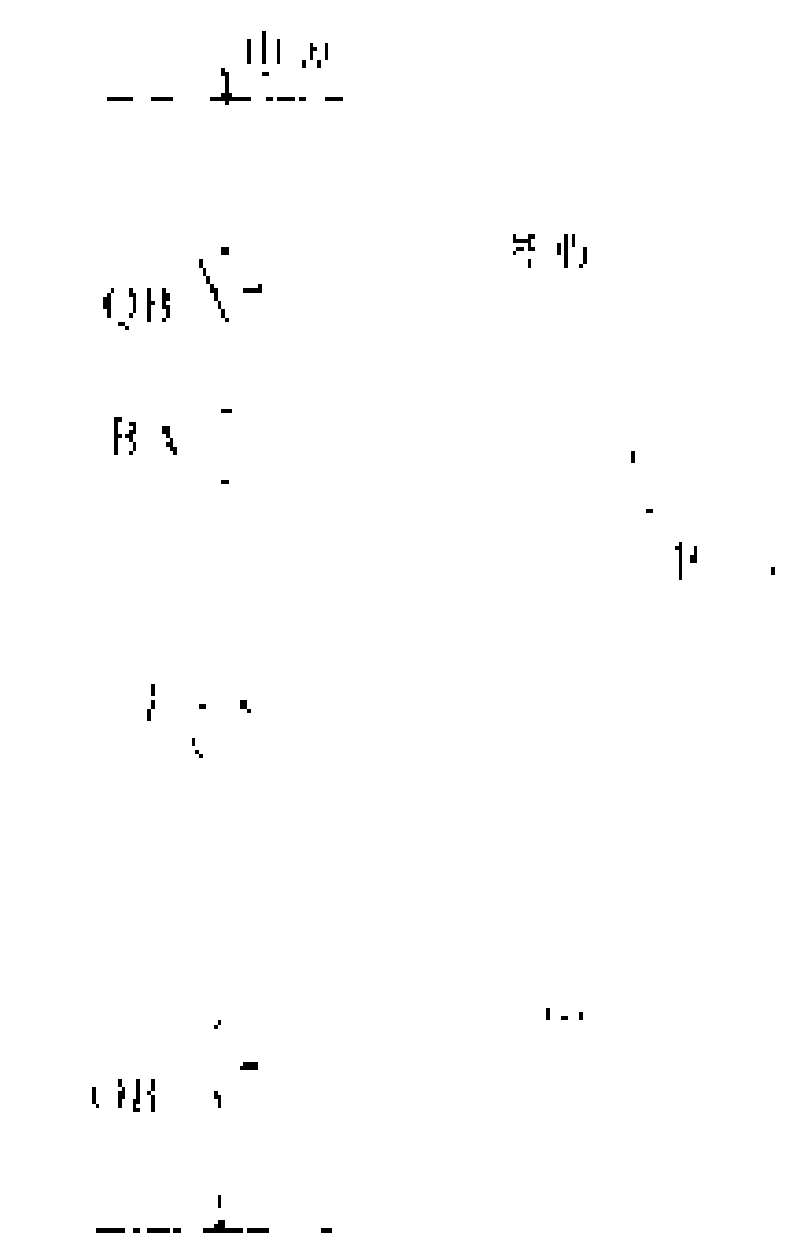


图 2 变压器电流速断保护原理接线图

实际上, 由于变压器本身的变比和接线造成的相角差, 其两侧的电流感器的变比和接

线要与之相配合, 使外部短路故障时流入差动继电器中的不平衡电流 (差电流) 最小; 其次, 电流互感器的特性和二次负荷要相匹配, 使其暂态和稳态误差低于允许值。此外, 为提高保护的灵敏度和可靠性, 还广泛

采用带制动特性的差动继电器。

当变压器空载投入或系统故障切除后电压恢复时,变压器一侧将流过可能达到 6~8 倍额定电流值的

励磁涌流,一般利用速饱和变压器来改变该电流中直流分量的传递,也可利用励磁涌流的二次谐波分量或间断角等特征来制动,以防止差动保护的误动作。

过电流保护 一般由瞬时动作的电流继电器和时间继电器构成,用作相间保护,并作为差动保护的后备保护。其动作值按躲过可能的最大负荷电流整定,动作后断开变压器各侧的

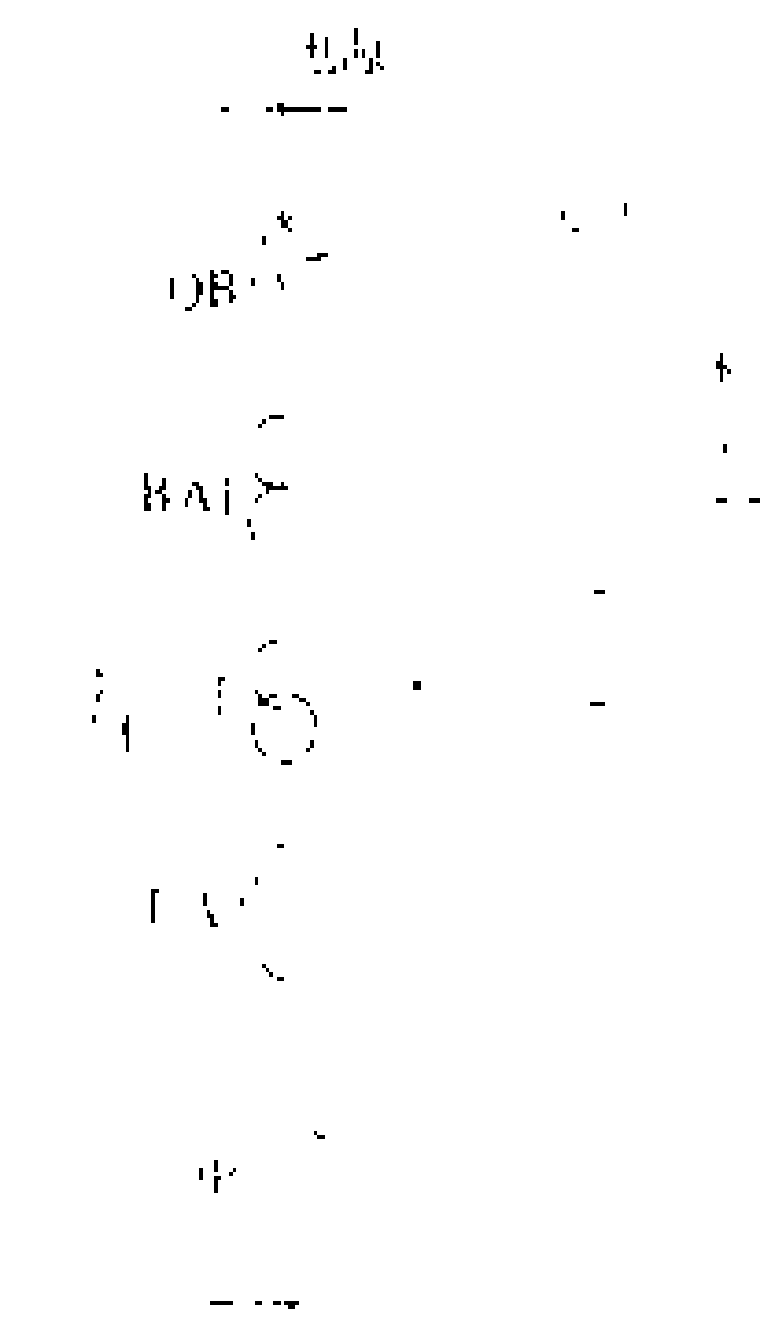


图3 变压器差动保护原理接线图

断路器。

在采用一般过电流保护不能满足灵敏度要求时,有时装设特殊的电流保护,如低电压起动的过电流保护、复合电压起动的过电流保护、方向过电流保护、负序过电流保护、阻抗保护、零序电流保护或零序电流电压保护等。

**反应异常运行的保护** 主要有过负荷保护,一般由一个瞬时动作的电流继电器和时间继电器构成。这是一种按长期允许的工作电流整定其动作电流值的过电流保护,接于任一相电流上,延时动作于发信号。此外,尚有反应变压器内部轻微故障的轻瓦斯保护、变压器油位下降和温度升高的保护、冷却系统故障的保护以及反应系统电压升高防止变压器过励磁的保护等,分别作用于信号或跳闸。变压器油中溶解气体的定期取样色谱分析,则是对变压器内部存在的潜伏性局部过热和放电故障的监测和判断手段。

**保护的配置原则** 反应短路故障的保护一般配置有主保护和后备保护,反应异常运行的保护一般不装设后备保护。在变压器上装设哪几种保护,要按变压器的电压等级、容量大小、接线方式等具体情况确定。

**发展概况** 中国于 20 世纪 70 年代前,基本上采用电磁性、感应性继电器和浮筒水银接点式瓦斯继电器构成变压器的各种保护装置。70 年代初,成功研制了第一代晶体管保护装置,在 330 kV 系统中试用;也有采用挡板干簧接点式瓦斯继电器的。80 年代初,成功研制了 500 kV 系统用的晶体管保护装置,在中国东北和华中系统中试用。随后又引进了一些国外产品,并在华中至华东直流±500 kV 输电工程中引进了瑞士

BBC 公司的微机型保护装置。随着电子工业技术的不断发展,新一代的集成电路型或微机型保护装置(包括变压器保护)将是一种发展的趋势。

参见彩图插页第 18 页 56 图。

(梁奕荣)

bianyaoqi guzhang

**变压器故障** (transformer fault) 在电力变压器的某一部位出现的影响其正常运行的缺陷或损坏。变压器的各个部位包括磁路、绕组、端子或套管、绝缘和冷却系统、无励磁或有载调压装置等,都有可能发生故障。其中有些故障具有一个较缓慢的发生和发展过程,称为慢性故障,对这类故障如能用检测方法事先发现并及时作出诊断和处理,可以避免事故的发生。另有一类急剧发展成事故的突发性故障,事前不易发现。慢性故障如不及时消除,有可能发展成为突发性故障。变压器故障的性质可大致区分为过热性故障和放电性故障。过热性故障是由于故障点引起局部温度异常升高,致使周围绝缘介质裂解而危及绝缘性能或机械强度的故障;放电性故障是由于施加于某一部位的电场强度超过了该处的绝缘强度,致使发生局部击穿或局部放电甚至形成贯穿性击穿的故障。不同性质的故障可能同时存在于一台变压器中,使得变压器故障诊断技术更加复杂。

变压器磁路故障以慢性故障居多,伴随有严重的过热现象。引起磁路故障的主要原因有:①铁芯硅钢片质量差或磁通密度选择过高;②硅钢片间绝缘不良或切口毛刺较多;③用于紧固铁芯的穿钉、螺母、垫圈等与铁芯或夹件短路,或是铁芯的接地片使铁芯局部短路或形成多点接地;④磁场中存在脱落的螺母、硅钢片等异物或杂质过多。

在变压器的绕组和绝缘系统中,由于纵绝缘被损坏引起的匝(层)间短路,通常表现为突发性故障。绕组和绝缘故障的主要原因和事故形态有:①绝缘导线加工粗糙或制造中局部绝缘受损;②绝缘结构设计不合理,绕组屏蔽设计或安装不当,或过电压保护措施不完善,在雷击或其他过电压作用下遭致损坏;③绝缘干燥处理不彻底或进水受潮;④接地部位存在不良接地或运行操作不当,引起中性点电位升高致使绝缘击穿;⑤绝缘处理或运行维护不当引起局部放电;⑥绕组承受短路能力不够而严重变形;⑦导线连接处焊接不良,引起接头处过热或放电;⑧导线换位不当,线股间短路或加工中意外地形成短路环引起很大环流,绕组油道阻塞、过载严重或冷却系统不正常等,引起绕组绝缘过热老化;⑨在大型变压器中有可能因冷却系统配置不当等多种因素,引起油流静电放电导致绝缘损坏。

变压器的组件因质量不良或维护不当而引起的故障有：①套管内部绝缘故障或端子接触不良发热；②调压装置的操作机构失灵或切换接点接触不良；③潜油泵的轴承磨损和滤网破损等原因使金属末和杂质进入变压器内；④套管顶部的引线连接处或水冷却器连接处密封不严，防爆管或油枕内结露，导致变压器受潮；⑤冷却器的冷却管堵塞或冷却器表面大量积污，影响散热而导致油温过高；⑥油箱及其连接处密封不严，出现渗漏油。

对运行中的变压器按规定进行维护和定期进行预防性试验，是及时发现故障和防止突发性事故发生的有效方法。使用在线监测技术是更先进的维护手段。

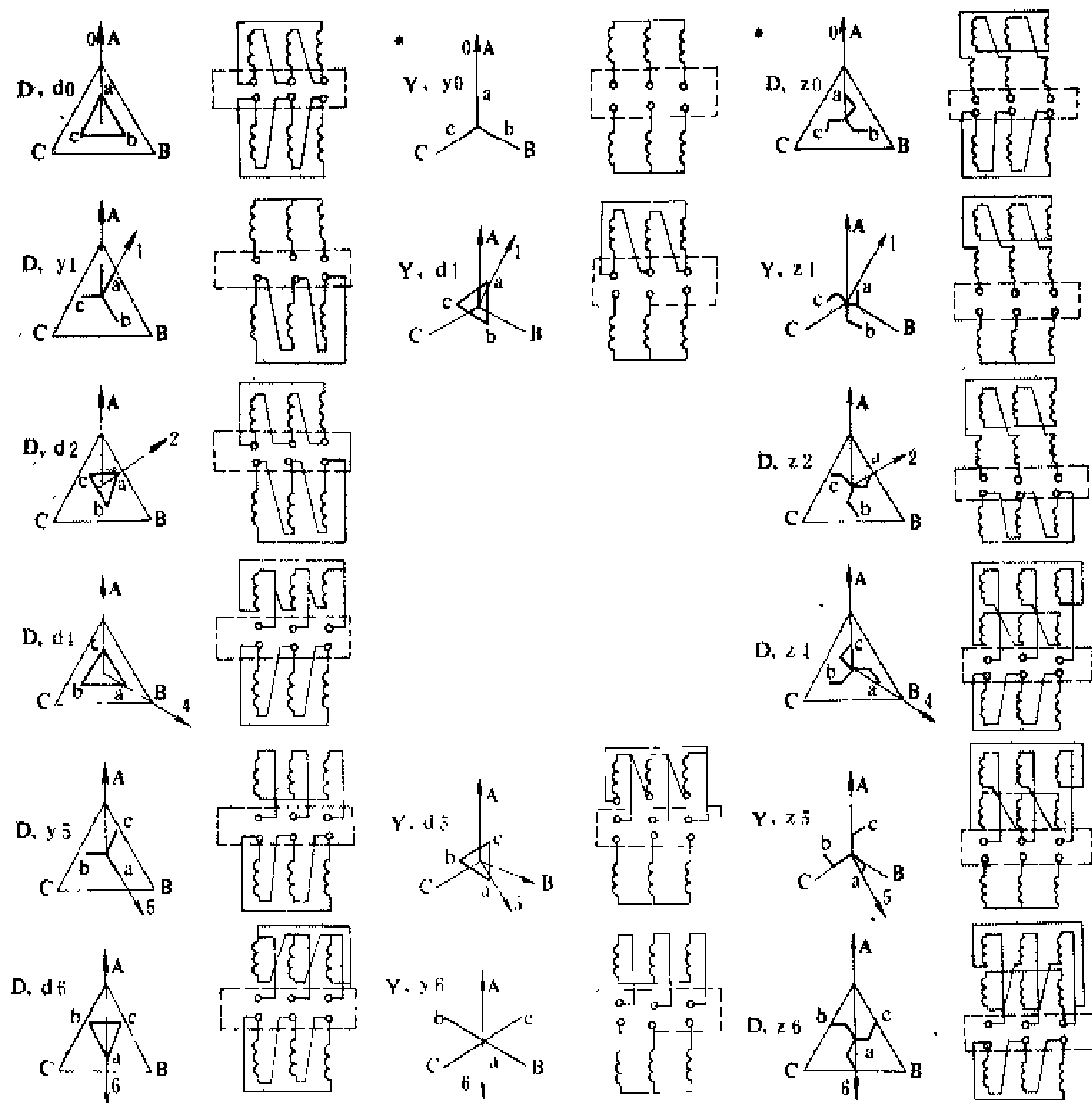
(凌 彪)

bianyaqi jilixian zubie

**变压器接线组别** (connection of transformer windings) 变压器的三相高压、中压（如果有）和低压绕组用一组字母表示连接方式，并用钟时序数

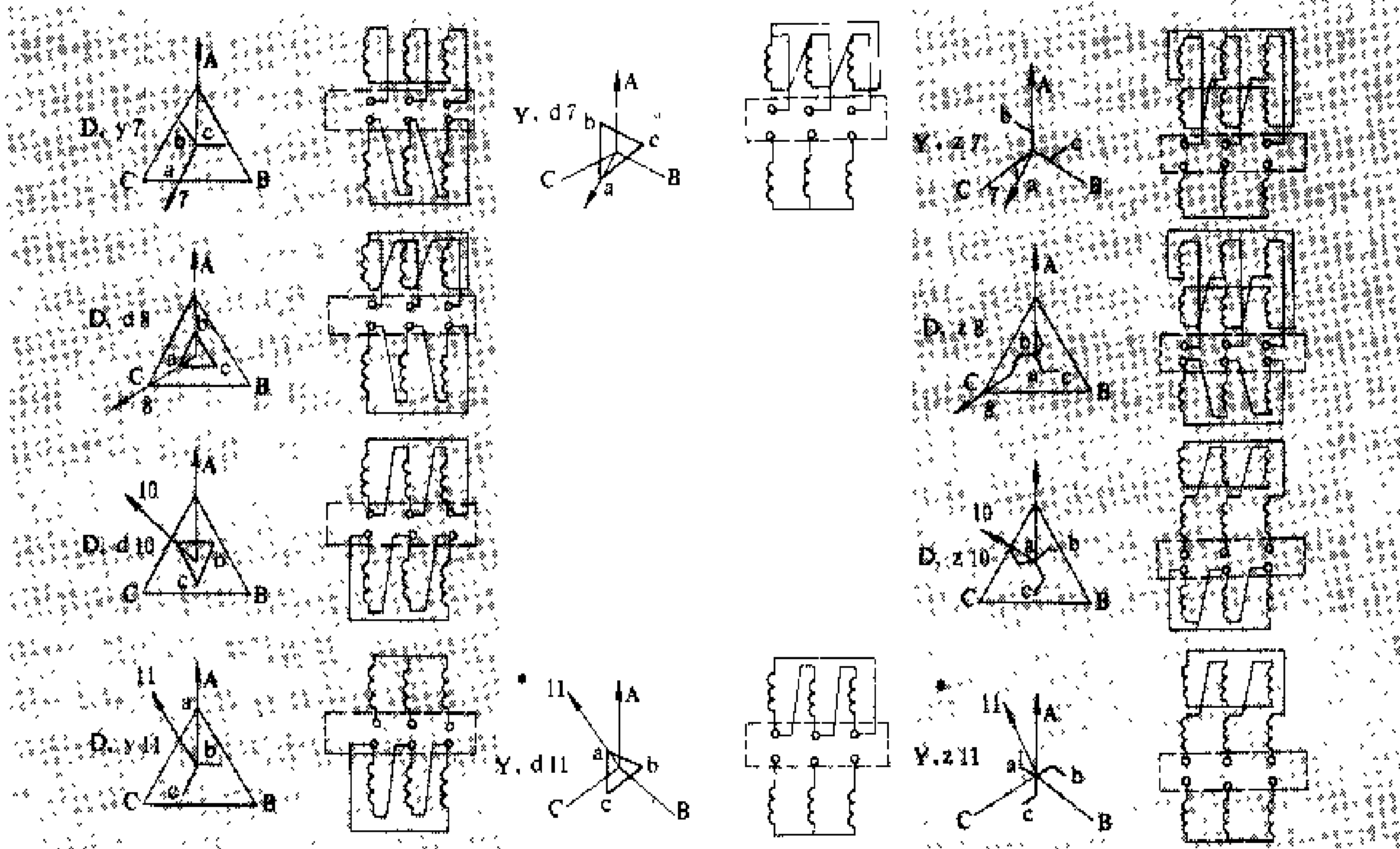
表示中压或低压绕组对高压绕组相对的相位移的通用标号，也称连接组标号。三相和三个单相变压器的三个相同电压的相绕组可连接成星形、三角形、曲折形等，其高压绕组相应的代表符号为 Y、D、Z，中压和低压绕组相应的代表符号为 y、d、z。如果星形或曲折形连接的绕组其中性点引出时，则高压绕组侧分别以 YN 或 ZN 表示，中压和低压侧分别以 yn 或 zn 表示。在自耦变压器中，额定电压低的绕组（公共部分）用字母“a”表示，如接线为“YN，a”，则表示为中性点引出的星形连接的自耦变压器。

不同电压绕组的相位移是指某两个不同电压的绕组中，各相应端子与中性点间电压相量之间的角度差。用钟时数表示的相位移，是将其高压绕组的一个端子相量（分针）定在假定时钟的 12 点上，此时有一定相位移的低压绕组相应端子相量（时针）所指的时数即代表接线组别，如 YN，d11。从理论上讲，可以有多种不同的接线组别，但实际常用的并不多。如图所示为用连接组标号表示的三相变压器的绕组连接方式标志示例。



用连接组标号表示的三相变压器的绕组连接标志示例（一）

注：有“\*”者为常用的连接方式。



用连接组标号表示的三相变压器的绕组连接标志示例（二）

注：有“\*”者为常用的连接方式。

（凌 彪）

bianyaqi lengque

### 变压器冷却 (transformer cooling)

通过冷却介质把电力变压器运行中产生的热量散发出去，使各指定部位的温升不超过规定限值的措施。变压器的温升，是由交变磁通在铁芯内产生的磁滞损耗和涡流损耗（铁损）、负荷电流在绕组中产生的电阻损耗（铜损）以及在其他金属部件与绝缘物处产生的附加损耗转变为热能而引起的。在过载情况下，各种损耗激增，变压器温升更为显著。变压器温升越高，器身与绝缘介质的老化和损坏也越迅速。因此，变压器的技术标准中明确规定出绕组、铁芯与绝缘介质在指定条件下的最大允许温升，以保证变压器的安全运行和正常的使用寿命。

变压器的发热与冷却既同铁芯、绕组和绝缘介质的发热时间常数以及器身及其容器的结构有关，又受冷却装置和冷却介质性能的影响。在各种冷却方式中，油浸式变压器最具有代表性。

油浸式变压器的绝缘油也是一种导热介质。变压器借助绝缘油的对流作用，从内向外传导器身的热量，再通过油箱表面和散热器的辐射作用，把热量散发到周围冷却介质中。油浸式变压器的冷却方式主要有油浸自冷式、油浸风冷式和油浸水冷式三种。

油浸自冷式 借助变压器周围空气的受热自然流动而带走热量的冷却方式。通常将油浸式变压器的油箱表面作成波纹或板翅状，或在油箱壁上焊装圆形或

扁形钢管，以增加散热面积。油浸自冷式大都用于小型变压器。当变压器容量达到 2000 kV·A 时，常配装多只冷却性能较好的圆形或扁形组合式单元散热器。

油浸风冷式 配装多只高效率的组合式单元散热器，并借助分散或集中配置的风机将气流吹向其高温表面，从而将热量带走的冷却方式。油浸风冷式大都用于大中型变压器。当变压器容量达到 100 MV·A 以上时，常采用强迫油循环风冷式，其散热器外部是绕有金属片的冷却管，内部是实行分隔的油回路，在向散热器强制吹风的同时，用潜油泵迫使高温的绝缘油在散热器与油箱间加速循环，并定向穿越绕组，从而提高冷却效率。此外，还在冷却系统中装设流速继电器、过滤器、净油器、油压表、温度计、放油塞、放气塞和控制箱等附件，用以实现自动控制、安全保护、数据测量和信号显示等功能。

油浸水冷式 改用水流代替气流来带走热量的冷却方式。其适用范围、工作原理与油浸风冷式基本相似。油浸水冷式多用于水源方便而有保证的水电站。为了防止水向绝缘油内渗漏，要装设差压继电器，作为监视运行水压和油压并在出现异常现象时停止水泵运行的保护装置。

干式变压器大多是以气体为冷却介质，除密封型的器身采用氮气之类的气体冷却外，一般都利用空气，有自冷和风冷两种冷却方式。

气体绝缘式变压器还可以采用蒸发冷却方式，冷

却介质为氟氯烷之类液体，当将它们喷向变压器器身时，从器身的发热表面吸收热量而发生气化，以其潜热实现冷却之后再冷凝为液体，循环使用。蒸发冷却方式的冷却效率很高，但因绝缘问题未得到圆满解决，目前仅用于电压不高的中小型变压器。

(庞骏骥)

bianyaqi shiyan

**变压器试验** (transformer tests) 根据有关技术标准，采用测试手段对电力变压器的性能及质量状况进行的检验。对变压器产品的试验分为出厂试验（或称例行试验）、型式试验和特殊试验，通常都是在制造厂进行。除此而外，还有变压器在安装竣工时的交接试验和运行期间的预防性试验。

变压器出厂试验是每台变压器均须承受的试验。电力变压器的出厂试验项目有：绕组电阻测定，电压比测量及电压相量关系的校核，阻抗电压及电压相量关系的测量，空载损耗和空载电流的测量，绝缘电阻、吸收比和介质损耗因数的测量，绝缘试验(包括1min工频耐压试验、感应耐压试验、雷电冲击全波和截波试验、操作波冲击耐压试验、局部放电试验等，按规定做上述全部或部分项目)，有载分接开关试验，绝缘油试验。出厂试验还应包括对油箱的密封性和机械强度的试验，对附件的检验以及其他必要的试验。

变压器型式试验是对变压器结构设计进行鉴定的试验。除全部出厂试验项目外，还增加一些技术条件规定的项目。电力变压器型式试验项目有温升试验和绝缘试验，如果雷电冲击全波和截波试验未列入出厂试验项目，则须作为型式试验项目。

变压器特殊试验是除出厂试验和型式试验外，由制造厂和用户商定增加的试验项目。电力变压器的特殊试验项目有：声级测量，短路试验，三相变压器零序

阻抗测量，空载电流谐波测量，风扇和油泵电机消耗功率测量等。

国际电工委员会(IEC)和世界上许多国家都制订了变压器试验标准。中国的国家标准GB 1904《电力变压器》与IEC的标准基本相同。

(王乃庆)

bianyaqi tiaoya zhuangzhi

**变压器调压装置** (voltage regulator of transformer) 控制电力变压器输出电压在指定范围内变动的调节组件。分无励磁调压装置和有载调压装置两种。由于调压是利用开关设备对变压器绕组的分

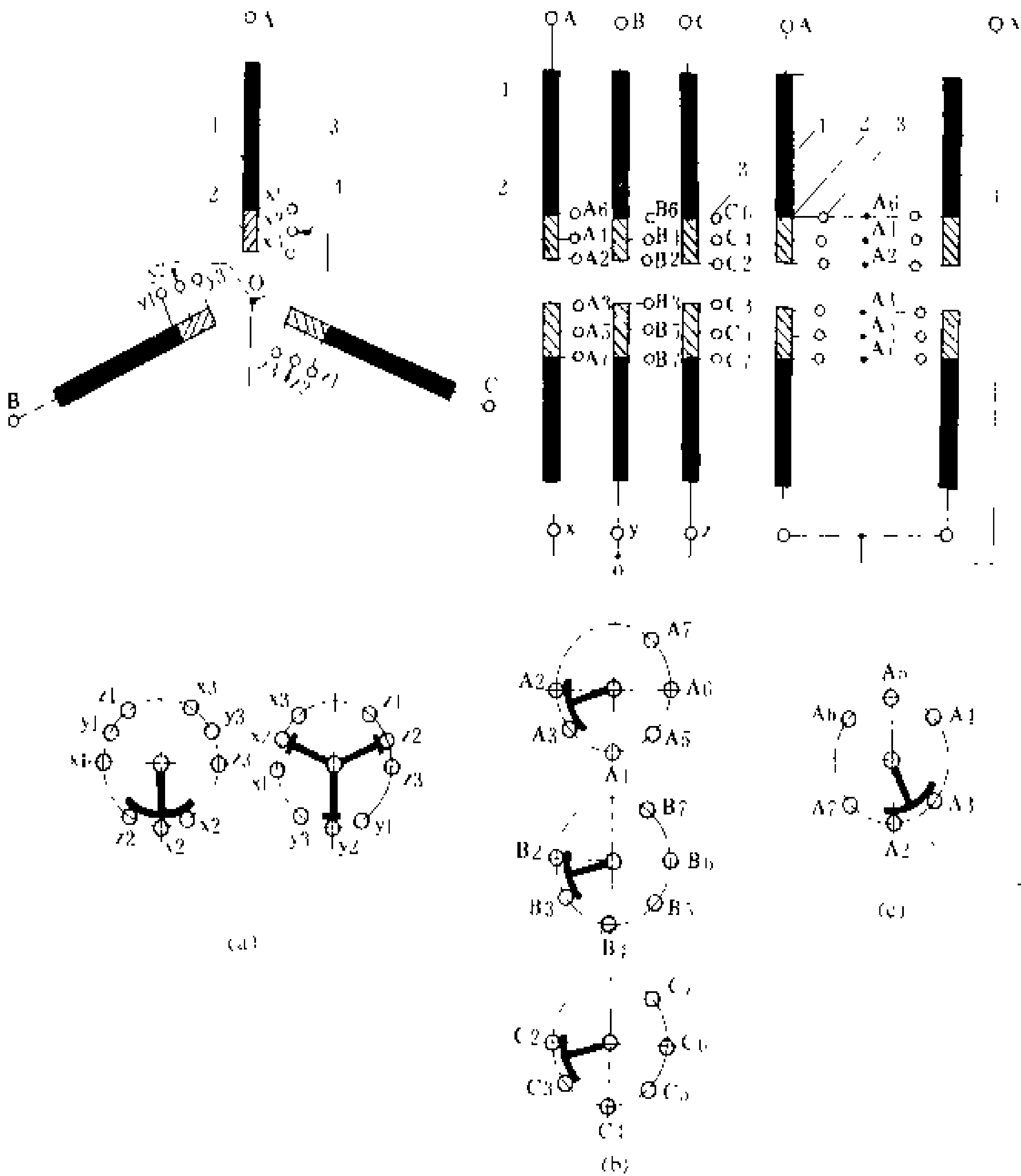


图1 无励磁调压装置的线性调压电路组合图

(a) 三相中性点调节式；(b) 三相绕组中央调节式；(c) 单相绕组中央调节式  
1—基本绕组；2—调压绕组；3—绕组分接头（静触头）；4—动触头

接头逐级切换使其变压比改变的过程，所以变压器调压装置又称之为变压器分接开关。

无励磁调压装置

在变压器不带电条件下切换绕组中线圈抽头以实

现调压的装置,也称无励磁分接开关。这种调压装置结构简单,成本低,可靠性高,但调压范围较小,只适用于不需要经常调压的场合。

**电路** 由基本绕组与调压绕组按线性排列而成。调压绕组的分接头依次接到切换开关的静触头。通过开关触头的接通与开断,实现分接头的不同组合,达到改变电压的目的。调压电路有三相与单相两类(见图1),三相调压电路用于中小型变压器,常见为中性点调节式或绕组中央调节式;单相调压电路用于单相或三相大型变压器,多为绕组中央调节式。

**结构** 无励磁调压装置包括装置本体与操作机构两部分。本体部分由以绝缘套支持的切换开关与调压绕组分接头引线座组成,装配在变压器油箱盖下或器身侧面。切换开关的动、静触头间要保持有适量的接触压力与导电性能。操作时要有自动找正、限位和清洗接触面的功能。大容量电力变压器常用环形或楔形触头,小容量变压器常用扇形或夹片形触头。操作机构为手动式,装配在变压器的油箱盖顶或侧壁上,通过绝缘杆或附加的垂直轴、水平轴与齿轮盒同本体部分的转轴联接。

### 有载调压装置

在变压器不中断运行的带电状态下进行调压的装置,也称有载分接开关。通过有载调压装置进行电压调整,既可以稳定电力网的电压,又能够提高供电的可靠性与经济性。在有载调压装置中,真空有载开关和晶闸管有载开关的技术得到广泛应用,并且向着高电压和大容量方向发展。但有载调压装置的电路与结构都比较复杂。参见彩图插页第16页51图。

**电路** 电力变压器的有载调压装置多采用分级调压、有触点油中切换、快速电阻过渡、埋入型和组合式结构。其电路由调压电路、选择电路和切换电路组成(见图2)。

**调压电路** 用来实现变压器绕组分接头的组合,由基本绕组、调压绕组和正反调开关组成(见图2),多用于调压范围较大、额定电压较高的变压器。当基本绕组与调压绕组作正接或反接时,将产生同向或反向磁通,相当于在基本绕组上增加或减少调压绕组的分接匝数,从而把调压范围扩大一倍。对于调压范围较大的工业用变压器,可以用具有多级粗、细调压绕组或正反调压与粗细调压相配合的调压电路。

在双绕组与三绕组变压器上,多半采用经济效益较好的中性点调压电器。对于自耦变压器,则需根据系统条件、调压范围以及变压器的运输重量和外形尺寸,来选择中性点调压、中压绕组线端或中央调压和第三绕组调压等适当的调压电路。

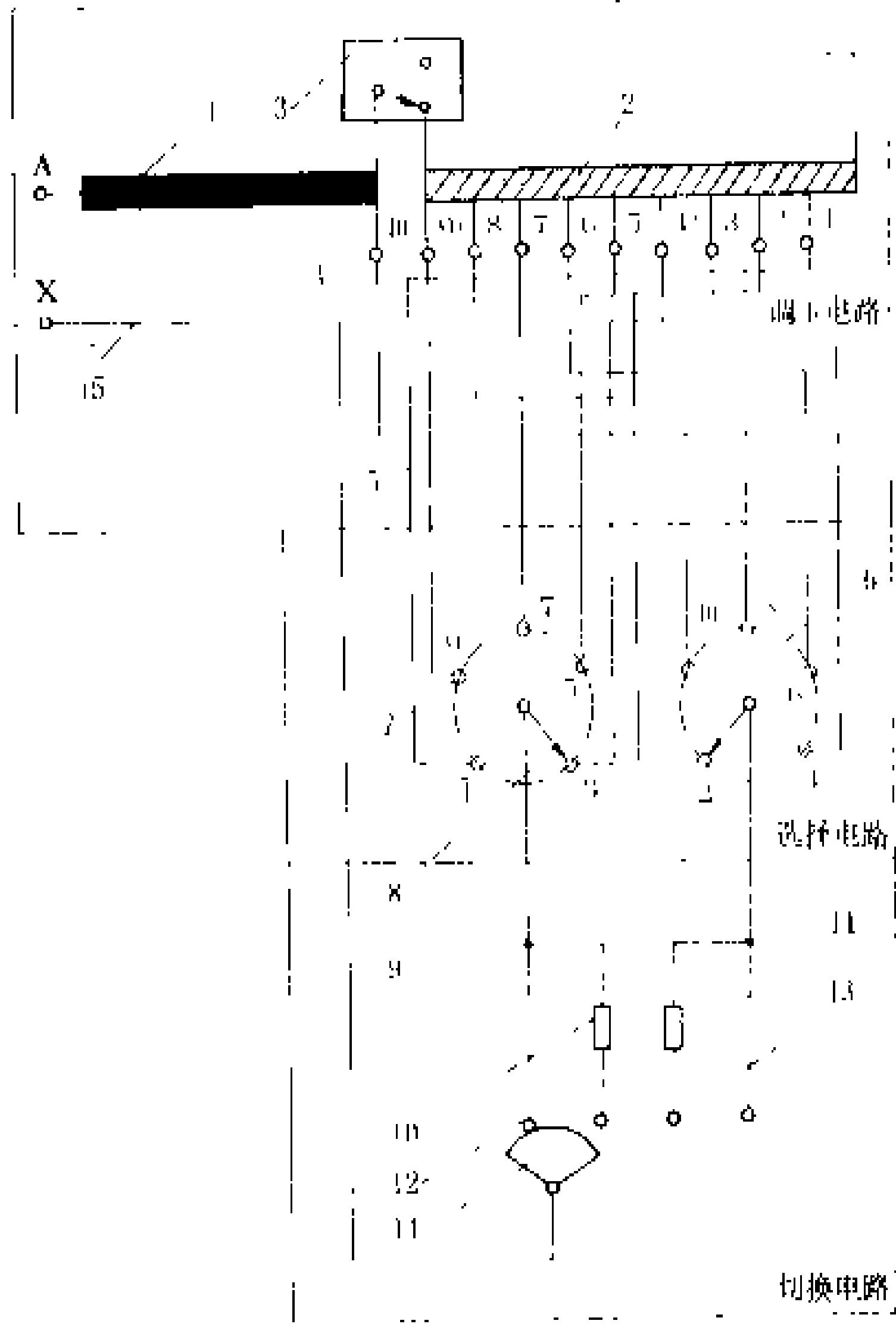


图2 有载调压装置的单相电路组合图

- 1—基本绕组; 2—调压绕组; 3—正反调开关; 4—绕组分接头; 5—调压电路与选接电路连接线; 6—选择器; 7—选择器开关静触头; 8—选择器开关动触头; 9—选择电路与切换电路连接线; 10—过渡电阻器; 11—切换器; 12—切换器开关静触头; 13—切换器开关过渡静触头; 14—切换器开关动触头; 15—变压器绕组引线

**选择电路** 用来实现变压器绕组分接头的位置选择。其主要部分是带选择开关和电气连接线的选择器(见图2)。选择开关有单数组和双数组,通过连接线将每只静触头与相应编号的调压绕组分接头相连,动触头则引接切换电路。换接过程中,动触头按照指定程序轮流地选接单数或双数静触头。当单数侧电路接通时,双数侧即已作好选择下个分接位置的准备,反之亦然。由于选择开关只在开路状态下换接,触头不会受到电弧的烧蚀。另有一种简化结构的复合型有载调压装置,取消了单独的选择电路,其选择开关带着切换触头,一般仅应用于调压级数不多的小型变压器。

**切换电路** 用来实现变压器负载功能的转换。其主要部分是油中快速切换开关与过渡电阻器组成的切换器(见图2)。有载调压过程中,切换开关不断地换接,但其动触头始终同主静触头或过渡静触头之一接通,同时熄灭负载电流转换瞬间产生的电弧。过渡电阻器装在与主电路并联的过渡电路上,用以减轻切换开关触头的电弧烧蚀程度,防止相邻分接头之间的绕组短路,限制过渡电路中的循环电流。通常使用较多的是

具有两个或四个过渡电阻的过渡电路。

**结构** 有载调压装置也包括装置本体与操作机构两个部分。

**装置本体** 有载调压装置的本体实际上就是选择电路与切换电路内各电气、机械元件的组合体,其外观呈圆筒状,选择开关在下部,切换开关在上部,中间是快速机构。操作机构的动力通过传动轴分别传送给切换开关和选择开关。选择开关是慢速动作机构,在动作周期内完成线圈分接头的选择动作。切换开关是一种弹簧储能的快速机构,在动作顺序中某一规定的瞬间实现快速切换,以利于大电流电弧在油中熄灭。切换开关和选择开关的动作顺序是靠本体的机构来保证的。选择开关常用浮动形或夹片形触头,切换开关常用扇形滚转式触头。由于灭弧的需要,切换开关装在注满绝缘油的单独绝缘筒内,从筒底或筒壁出线。

通常用连接法兰将有载调压装置的本体部分固定在变压器油箱顶盖下面。对于钟罩式油箱,则将有载调压装置的本体部分做成固定或可以临时固定在变压器器身夹件支铁上的结构,以满足起吊钟罩式油箱的需要。

**操作机构** 有载调压装置常用电动步进式操作机构。机构箱装在油箱的顶盖或侧壁上,通过垂直轴、水平轴与齿轮盒同本体部分的绝缘轴联接。操作机构的传动系统有主要传动与辅助传动两路。主要传动系统又分电动和手动两支,通过各自的齿轮换向装置组合把动力传向本体部分,按预定程序完成相应电压的分接位置变换。辅助传动系统的作用则是供给顺序操作、位置指示、位置极限和动作计数等元件动作所需的动力。

**监控** 有载调压装置的监控系统包括保护、控制、信号指示的元件和电路。保护方面有:切换开关油室内压力异常时的安全释放器或压力继电器;电动操作程序不正常、变压器绕组过负荷或处于其他紧急情况下,能够切断操作机构电源的电路等。控制方面有:防止操作时选择开关超越极限位置的电气闭锁和机械止挡;防止电动与手动操作同时发生的联锁开关;按程序完成一级调压后停止动作的顺序开关;操作过程的自保持电路;断电恢复后继续进行原操作程序的电路;远距离调压操作的电路等。信号指示方面有:切换开关油室内压力异常信号;操作信号、停止操作信号和不正常操作信号;多台装置并列运行的失步信号;分接位置指示;操作计数指示等。

**测试** 包括型式试验、出厂试验、交接和运行试验。型式试验项目有:切换试验,短路电流试验,过渡电阻试验,机械寿命试验,绝缘试验,触头温升试验等。出厂试验项目有:机械动作试验,操作机构试验,工作

顺序试验,空载下电动、手动操作试验,额定电流下电动操作试验等。交接和运行试验一般包括:空载下电动、手动操作试验,分接位置检验,工作顺序图测量,电压比测量,直流电阻测量,绝缘油试验,监控元件动作试验等。

(庞骏骥)

bianyaqi wei hu jianxiu

**变压器维护检修** (transformer maintenance and overhaul)

对运行中或停运期间的电力变压器进行技术处理,以保持其正常的运行状态或消除已暴露出的缺陷。变压器维护是在变压器的整个服役期间经常需要进行的工作,包括在运行期间清扫冷却器表面积尘,更换呼吸器中的吸湿剂,取油样做定期试验等;也包括短期停电调整分接头,处理个别渗漏油部位或更换个别零部件等工作。变压器维护工作的主要目的是保证变压器运行条件良好,绝缘不过热,不受潮。变压器检修分为小修、大修及事故检修三种。

**小修** 变压器小修通常每年一次,停电进行。小修的内容包括在变压器外部进行全面的检修和试验,消除已发现的缺陷,清扫绝缘瓷套管表面,检查导电接触部位,检查和维修油路及全部冷却系统,检查和维修保护、测量及操作系统,有载分接开关(见变压器调压装置)换油或检修。经小修后的变压器应达到从外部看是无缺陷的。

**大修** 变压器大修周期有不同的规定,重要的变压器投运后第五年和以后每5~10年需大修一次,一般的变压器每10年进行一次大修,大容量电力系统中运行的主变压器在承受出口短路故障后要提前大修。变压器大修时要吊出器身或吊开钟罩外壳,在不具备吊装条件时需进行排油后检修人员进入油箱,直接对器身进行检查和维修。大修的内容主要是检查和处理线圈的压紧状态,铁芯及电屏蔽的绝缘和接地状态,穿芯螺栓的绝缘状态,分接开关的电接触状态。大修还包括油处理及油箱内部清洗,必要时还需对器身作干燥处理。大修时对变压器需进行全面检查、调整、维修和试验。经大修后的变压器应具备该变压器设计要求的内在质量,以保证继续安全运行。

**事故检修** 发现变压器有异常状况并经试验证明内部有故障时,临时进行大修。事故检修时要依照具体故障的部位进行修复及全面处理和试验。

参见彩图插页第17页53图。

(陈叔涛 王乃庆)

bianyaqi you

**变压器油** (transformer oil) 电气绝缘用

油的一种。用于油浸式电力变压器、互感器、充油套管、油断路器等电气设备中，起绝缘、冷却、散热、灭弧等作用。变压器油按凝固点、闪点不同分为几个级别或牌号。国际电工委员会(IEC)标准把变压器油分为Ⅰ号、Ⅱ号、Ⅲ号三个级别，其凝固点分别为-30℃、-45℃、-60℃。中国按凝固点不同将变压器油分10号、25号和45号三个牌号。牌号数即为凝固点的摄氏零下度数。实际使用时，可根据变压器所在地区的气温选用适当牌号的变压器油。

变压器油分矿物变压器油和合成变压器油两种。矿物变压器油是由天然石油加工炼制而成。石油(俗称原油)经常压及减压蒸馏可得到各种馏分。矿物变压器油是将石油在260~340℃温度下分馏，再经精制而得，其成份有烷烃、环烷烃及芳香烃三大类。以烷烃为主的石油称为石蜡基原油，含环烷烃较多的石油称为环烷基原油。为提高变压器油的抗氧化安定性，可加入抗氧化添加剂。合成变压器油是用人工合成的方法生产出来的绝缘油，它在某些特性上优于矿物变压器油，如聚氯联苯、硅油(聚二甲基硅氧烷)、三甲醇基丙烷酯和季戊四醇酯等都具有难燃或不燃的特性，又如烷基苯具有抗析气特性等。

变压器油有高介电强度、较低的粘度、较高的闪点温度、良好的低温特性及抗氧化能力等基本特性。变压器油的性质由下列物理、化学及电气特性来表示：外观、色度、比重、粘度、闪点、凝固点、界面张力、水分、氧化安定性、酸值、油泥、腐蚀性硫、介质损耗因数、工频及冲击击穿电压、析气性等。测定这些指标均有相应的标准试验方法。世界各国及国际电工委员会都制订了变压器油油质标准。这些标准用来监督新的、设备投入运行前的及运行中的变压器油。对性能不合要求的变压器油，可以进行处理或更换新油，以满足保证变压器等充油电气设备安全、可靠、经济运行的要求。

变压器油在运行中由于接触氧气和水分，并在温度、电场及化学复分解作用下会产生劣化。除了氧化产生生物外，还有许多杂质如水分、固形物和不溶性极性杂质也可能在运行中积聚于油内，使其性能下降。另外，设备浸油部分若有故障或材料劣化，也可能从油特性参数的变化反映出来。因此，为监督油的劣化程度及设备的内部状况，进行检验、测定及规定相应的技术指标是必要的。

早在1887年，矿物油首次被用作变压器油。1931年首次用聚氯联苯作为合成变压器油。1956年硅油开始用作绝缘油。由于矿物变压器油在来源、价格及性能诸方面所占的优势，使它一直占据着变压器油的最重要的地位。为提高变压器油的性能所进行的研究课题

有：油的组分对电气性能的影响，油的气稳定性、热稳定性、耐电晕性，冲击击穿特性，油流带电倾向等。

近年来，用气相色谱法分析溶解于油中的气体来判断设备内部的隐患缺陷，以及用液相色谱分析溶解于油中的纸的降解产物以判断设备中纸的老化程序，这些技术措施对保证设备安全运行都起到了积极的作用。

(范起明)

bianyaqi yunshu

## 变压器运输 (transformer transportation)

在两地间搬移电力变压器的工作过程。常见的是从制造厂到安装现场的运输，包括装卸、运送和就位等工序。

**装卸** 在运载车船上装升和卸落变压器。通常按照器身重量和尺寸选择装卸工具，并根据工作现场和施工机具配备等条件采用起吊或牵引方式。利用起重机械垂直升落变压器以实现装卸，具有操作简便、安全高效的优点。而利用牵引机械水平或倾斜移动变压器的装卸方式，对工作条件要求不高，颇为实用。进行变压器装卸时，要从包装的重心或指定点起吊，平稳起落。器身及附件要合理放置，使重量均匀分布在车船装载面上。要紧固好器身及附件与车船间的系绳及止档。

**运送** 从制造厂或发运站将变压器转移到安装现场。通常根据起迄点间的交通路线和运载设备供给等条件，采取铁路、公路或水路运送方式。将变压器装在平车或凹型车上通过铁路运送，安全高效，常是优先考虑的方式。将变压器装在汽车或拖车上通过公路运送，方便实用，甚至能够运送特大型变压器。在安装现场或短距离转移变压器时，可以在公路或坚实平整的路面上铺设道木，通过滚筒或钢板进行滚运或滑运。将变压器装在货船或拖轮上通过水路运送，只能用于可以通航的地区。在运送变压器时，要按照器身重量和尺寸选择运送工具。要预先消除运送线上的障碍，处理路面、桥梁等薄弱环节。行进中要控制好行进速度和各个方向的冲击加速度。

**就位** 将变压器安置到正式运行的基础或工作台上。采取与装卸相似的方式进行。变压器就位后与基础或工作台的尺寸误差要符合规定。

为保证电气绝缘的完好无损和简化安装工序，最好在变压器总装注油后再整体运输，但这对高电压的大中型电力变压器有实际困难，常要采取拆卸油箱上的附件，分别包装，并放出油箱内的绝缘油改充气体，或设计特殊构造的运输专用油箱和专用车船等措施，尽可能减小变压器主体的运输重量和运输尺寸。对器身有较强的机械承受能力的铁壳式变压器，有时做成



卧式结构，以降低运输高度。在整个变压器运输过程中，要保持油箱密封，充油运输的变压器应无明显渗漏油现象，充气运输的变压器要保持气体的规定压力。  
(虎骏骥)

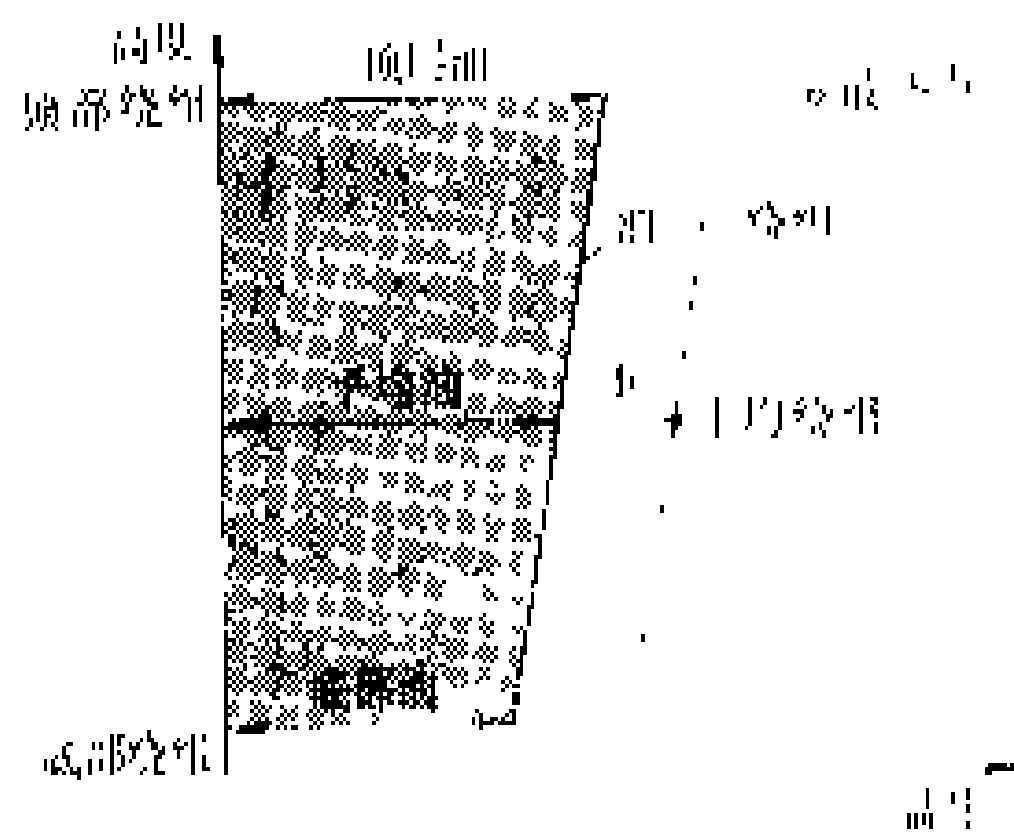
bianyaqi yunxing

**变压器运行** (transformer operation) 电力变压器进行电 换及能量传输的工作状态。对变压器运行的要求是：安全可靠，高效经济；正常负荷下输出电压保持在规定的范围内；紧急情况下能按规定的方式超铭牌出力运行。当单台变压器容量不够时，可以采用两台以上并联运行的方式。为实现对变压器运行的要求，有关标准规定了变压器的使用条件、允许温升、超铭牌出力、并列运行和监视维护事项。

**使用条件** 变压器的正常使用条件为：海拔不超过 1000m；最高气温+40℃，最高日平均气温+30℃，最高年平均气温+20℃，最低气温对户外和户内分别为-30℃和-5℃；冷却水最高入口温度为+30℃；电压波形近似于正弦波；多相电源电压近似对称。特殊的使用条件下，变压器的额定参数要有相应的改变。例如，当冷却空气温度超过上述正常值，但超过值不大于 10℃时，则温升限值按该超过值降低一个相同的值；运行在海拔高度超过 1000m 的场合，以每 500 m 为一级，温升限值按下列数值减少：油浸自冷式变压器减少 2.0%，油浸风冷式及强油风冷式变压器减少 3.0%。此外，对十分恶劣的运行条件，例如严重污秽区、地震频发区等，变压器应该有相应的特殊技术条件。

**允许温升** 变压器某一部位的温度高于冷却空气温度或冷却水入口温度的允许差值。变压器内部各部位的温升是不相同的。对油浸式变压器，油的温度自下而上逐渐升高，绕组的温度也有同样的变化规律，其温度分布如图所

示：绕组温度和油的温度在垂直方向上按两条平行直线分布，两者之间有一恒定的温度差  $\Delta t$ ；绕组在同一平面上温度也不相同，饼式线圈的绕组中部散热条件较差，因此最热点的温升还会高于该平面上的平均温升值。



绕组和油的温度分布图

变压器绝缘的寿命就是由最热点的温度所决定的。通常的温升试验只能测得变压器上层油温及冷却器各部位的油温，还可用测绕组直流电阻的方法来推

算各绕组的平均温度。但最热点的温度是无法用常规的方法测量的。近年来，采用光导纤维传递温度信号的方法，可测到处于高电位下绕组最热点的温度。中国国家标准 GB1094《电力变压器》中规定的油浸变压器温升限值为：绕组平均温升 65K（强迫油导向循环可为 70 K），顶层油温升 55 K（6300 kV·A 及以下的密封式变压器允许为 60 K），油箱及结构件表面温升 80 K。

**超铭牌出力** 变压器在额定负荷下，当冷却介质为 20℃时，若绕组的最热点温度为 98℃，其理论绝缘寿命为 20 年，这是正常的老化过程。变压器的绝缘在温度为 80~140℃之间时，每增加 6K，其老化速度增加一倍。实际变压器绝缘的温度随环境温度及运行负荷而变，因此其实际寿命将取决于寿命损失率的积分值。按正常运行条件设计的变压器，在满载运行的条件下，绝缘的热点温度在夏季时会超过 98℃，使得绝缘的老化速度加快，但冬季时情况相反，两者之间有补偿作用。变压器的超铭牌出力运行也是依据同样的原理，既要考虑到绝缘材料的耐热极限，还要考虑其寿命损失的程度。通常有正常的周期性超铭牌出力运行、长时间的急救性负荷和短时急救负荷三种超铭牌出力运行情况。

(1) 正常的周期性超铭牌出力运行。例如每天某一段时间负荷超过铭牌规定值，但其余时间负荷低于铭牌规定值。变压器的最热点温度取决于冷却介质温度、超铭牌出力运行前的负荷值、超铭牌出力运行的持续时间。从寿命损失角度看，高负荷时寿命损失的加快与低负荷时寿命损失的减缓相补偿，因此总体来说还是正常的老化过程。

(2) 长时间的急救性负荷。这是在系统中出现某种迫不得已的情况时，需要变压器较长时间带超过铭牌规定的负荷。此时绝缘温度将升高到某一规定的极限，绝缘的老化速度大大加快，寿命显著缩短，但还不至于因过热导致绝缘击穿而对安全运行造成严重威胁。这种运行方式的允许时间及过负荷程度与冷却介质的温度及原始负荷有关。

(3) 短时急救负荷。系统中出现紧急情况，需要变压器严重超载运行，绝缘温度升高到危险的程度。通常对油浸变压器的温度限制为不使绝缘产生许多气泡而可能导致电击穿。要求尽可能避免这种运行方式。允许变压器以这种方式运行的持续时间取决于起始时的运行温度，要尽可能短，通常限制在半小时以内。

对上述三种运行方式的具体限值及寿命损失计算，国际电工委员会 (IEC) 354 号出版物中有详细的规定。中国电力工业部颁发的《变压器运行规程》部分采纳了 IEC 的 354 号出版物中的有关规定。

**并列运行** 两台或多台变压器的一次侧和二次侧

都分别接在共同的母线上的运行方式。在变压器并列运行方式下,负荷应按各台变压器的容量合理分配,为此各并列运行的变压器应符合下列条件:

- (1) 连接组别和相序相同;
- (2) 变压比(包括各分接头的变压比)相等或在允许的偏差之内;
- (3) 阻抗电压(%)尽量接近,其相对偏差值一般不超过10%。

变压器运行效率是输出的有功功率与输入的有功功率之比。变压器的效率除与变压器的损耗有关外,还与负载的功率因数及负载率有关。当功率因数为一定时,变压器呈现最高效率的负载率 $\beta$ 为

$$\beta=\sqrt{\frac{P_0}{P_K}}$$

式中 $P_0$ 和 $P_K$ 分别为变压器的空载损耗和负荷损耗。由上式可见,变压器的经济运行和变压器设计的损耗比( $P_K/P_0$ )密切相关,因此对不同负载率的变压器应选用不同的损耗比。例如发电厂的变压器负载率很高,希望选用负载损耗小的变压器;相反,有些农用变压器负载率很低,最宜选用空载损耗小的变压器。

监视维护 对变压器运行状况的监视维护有以下三种情况:①对无人值班的配电变压器只有定期的外部检查,对其电压和负荷情况在发现异常时才进行调整;②有人值班的变电所,应按规定监视变压器各绕组的电压、电流和温度指示,巡视检查变压器的外部状况,特别是冷却器的工作状况;③对特别重要的大型变压器运行状况的监视,趋向于采用计算机化的在线监测系统,对变压器的电流、电压、温度、环境条件、冷却器投入台数、分接头位置等参数作全面监控,并按变压器具体参数随时确定超铭牌出力运行的能力及寿命损失,还可以包括油中溶解气体分析、绝缘局部放电探测、承受过电压记录等在线监测记录。

(陈叔涛 王乃庆)

binglian buchang zhuangzhi  
**并联补偿装置 (shunt compensators)**

基本原理 .....	47
补偿的基本原则 .....	47
主要类型 .....	47
静态无功补偿装置 .....	47
并联电容器 .....	47
滤波器 .....	48
并联电抗器 .....	48
动态无功补偿装置 .....	48
同步调相机 .....	48

静止补偿装置 .....	48
静止无功发生器 .....	48
主要技术性能 .....	48
用途 .....	49
用于负荷补偿 .....	49
用于交流输配电系统 .....	49
用于超高压直流输电系统 .....	49
兼作滤波装置 .....	49
发展简况 .....	50

并联在电力网上以供应或吸收无功功率的装置,常称无功补偿装置。但从广义上讲,无功补偿装置不仅包括并联补偿装置,还包括串联补偿装置。无功功率的性质,本有感性无功功率与容性无功功率的区别。电力系统的负荷大都是感性负荷,消耗感性无功,中国习惯上把感性无功直称为“无功”。一般情况下,不标明性质的无功功率,均是指感性无功功率。如:电容器是容性负荷,它吸收容性无功或发出感性无功,一般称电容器发出无功,或称电容器是无功电源;电抗器是感性负荷,它吸收感性无功或发出容性无功,一般称电抗器吸收无功;静止无功发生器既能供给无功也能吸收无功;对于无功补偿装置,则以提供无功的电容性元件称为“正补偿”,以消耗多余无功的电感性元件称为“负补偿”;既能提供无功又能消耗无功的元件,如静止补偿装置,则统称为“补偿”。

无功补偿技术的应用通常可分为负荷补偿和输电补偿两类。①负荷补偿通常是在用户内靠近负荷处对一个或一群负荷的无功进行的补偿,目的是提高功率因数,改善电压质量,减少或消除由于冲击性负荷、不对称负荷及非线性负荷等引起的电压波动(变化速度大于每秒0.2%额定电压的电压变动)、电压闪变(由于负荷急剧的波动,造成配电网产生瞬时电压降,导致白炽灯泡的光通量急剧波动的现象)、三相电压不平衡及电压波形畸变等危害;②输电补偿是对交流输配电网及超高压直流输电的换流站的无功进行的补偿,目的是支撑电网枢纽点电压,提高电网的稳定性,增大输电能力,抑制电网功率振荡及工频过电压,调相调压以及优化无功潮流等。(见输配电网无功补偿与电压调整)

无功补偿装置与有功电源不同,它不需原动机,大多由小单元组成,安装比较方便,可按需要选用和组合,分散安装在输配电网及负荷处,能做到无功就近供应、就地平衡。根据调节性能及补偿功能,无功补偿装置可分为静态无功补偿装置和动态无功补偿装置两大类。

基本原理

一般供电系统的补偿前、后接线可简化成如图 1 (a)、(c) 所示。图 1 (b)、(d) 所示为补偿前、后的电压相量图。从两相量图的对比中可以看出,加并联补偿 Q 后,由于负荷 P 所需的部分无功电流  $-i_c$  直接由 Q 就地供给,线路电流即从补偿前的  $i$  减少到  $i'$ ,使线路电阻压降  $iR$  和电感压降  $iX$  按比例减少,使受端电压  $\dot{U}_r$  和功率因数  $\cos\varphi$  分别提高到  $\dot{U}'_r$  和  $\cos\varphi'$ ,从而达到提高功率因数、改善电压质量、提高发供电设备有效利用率、减少线损、降低发电成本、提高系统稳定性等目的。

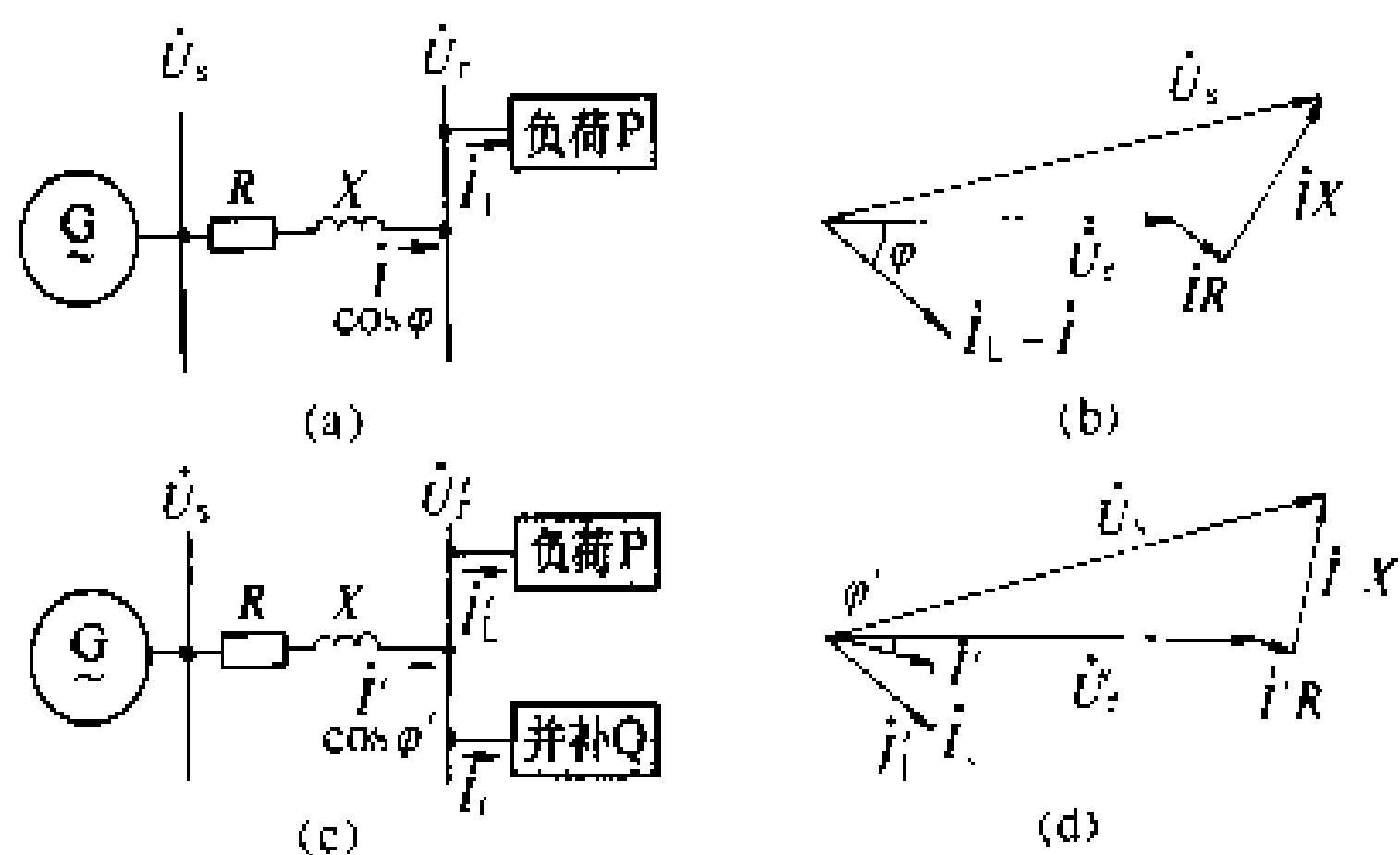


图 1 简化系统接线与电压相量图

(a) 补偿前接线图; (b) 补偿前相量图; (c) 补偿后接线图; (d) 补偿后相量图

$\dot{U}_s$ —送端电压;  $\dot{U}_r$ —补偿前受端电压;  $\dot{U}'_r$ —补偿后受端电压;  $i_L$ —补偿前负荷电流;  $i'_L$ —补偿后负荷电流;  $i_c$ —并联补偿电流;  $i$ —补偿前线路电流;  $i'$ —补偿后线路电流;  $\cos\varphi$ —补偿前受端功率因数;  $\cos\varphi'$ —补偿后受端功率因数;  $R$ —线路电阻;  $X$ —线路电抗

补偿的基本原则

国际大电网会议在 1986~1987 年发表的报告中提出了一些无功补偿的规划设计准则: ①不应远距离传送无功, 电网在正常情况下, 无功的供需应就地平衡; ②无功的备用量应足够, 以保证电网在事故情况下仍有可以接受的输送能力; ③为防止电网电压崩溃, 推荐采用 N-2 的安全准则; ④无功补偿装置的配备, 应使补偿装置费用及线损费用两者之和趋向最少。

中国原水利电力部在 1983 年及 1984 年颁发的《全国供用电规则》及 SD131《电力系统技术导则(试行)》中, 也规定了类似的原则。

电网公共供电点由冲击性负荷产生的电压波动与电压闪变, 中国标准规定一般不应超过表 1 中的允许值, 否则应采取补偿措施。表 2 中列出了电压闪变视感度系数  $a_f$  的值。

表 1 电压波动与电压闪变允许值

供电点电压等级	10 kV 及以下	35~110 kV	220 kV 及以上
电压波动(均方根值) $U_t$ (%)	2.5	2	1.6
电压闪变(10 Hz 等效值) $\Delta U_{10}$ (%)	供照明要求较高的白炽灯负荷 0.4 供一般照明负荷 0.6		

注: 1.  $U_t$  为变化速度大于每秒 0.2% 额定电压的电压波动, 低于此速度的电压波动不计, 其值为电压均方根的最大值与最小值之差, 以额定电压的百分数表示。

2.  $\Delta U_{10} = \sqrt{\sum (a_f \Delta U_f)^2}$  (%), 其中  $a_f$  为波动频率  $f$  (Hz) 的电压闪变视感度系数, 可从表 2 中查得;  $\Delta U_f$  为波动电压中频率为  $f$  的分量, 以额定电压的百分数表示。

表 2 电压闪变视感度系数  $a_f$

$f$ (Hz)	0.01	0.05	0.50	1.00	5.00
$a_f$	0.026	0.055	0.169	0.260	0.780
$f$ (Hz)	10.00	15.00	20.00	30.00	
$a_f$	1.000	0.845	0.655	0.357	

主要类型

并联补偿装置主要有 12 种, 如图 2 所示, 可分为静态无功补偿装置及动态无功补偿装置两大类。

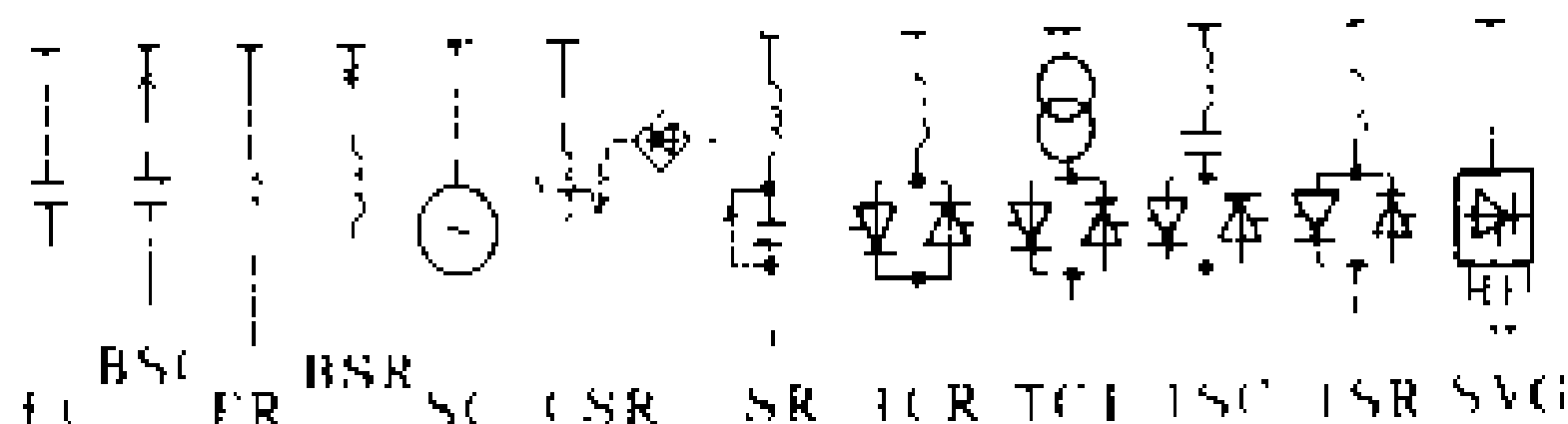


图 2 并联补偿装置的主要类型

FC—固定连接的并联电容器、滤波器; BSC—用断路器投切的并联电容器; FR—固定连接的并联电抗器; BSR—用断路器投切的并联电抗器; SC—同步调相机; CSR—可控饱和电抗器型静止补偿装置; SR—自饱和电抗器型静止补偿装置; TCR—晶闸管控制电抗器型静止补偿装置; TCT—晶闸管控制变压器型静止补偿装置; TSC—晶闸管投切电容器型静止补偿装置; TSR—晶闸管投切电抗器型静止补偿装置; SVG—静止无功发生器

**静态无功补偿装置** 包括并联电容器、滤波器及并联电抗器。其特点是与电网固定连接, 不能调节, 或者只能用断路器分组投切进行不频繁的有级慢速调节, 主要用于稳态无功负荷的补偿。

并联电容器 由电力电容器单元组成, 其优点是

易于组合及发展适应性好,适于分散安装就地补偿,投资省,能耗低,运行可靠,维修方便,无噪声。它是使用最多的一种无功补偿装置。它还可以配套组成静止补偿装置,并兼作滤波器用。并联电容器与电网连接方式分固定连接及用断路器分组投切两种,后者用于大容量电容器组,以利于随负荷调节。(见并联电容器)

滤波器 通常是由与静止补偿装置配套的固定连接的电容器组回路设计而成,对于需要滤除的高次谐波构成串联谐振回路,把谐波消除掉。(见静止补偿滤波装置)

并联电抗器 超高压并联电抗器是固定连接在超高压线路上,主要是为了限制工频过电压。接在主变压器第三绕组或高中压配电母线上的并联电抗器,主要为了调相调压,一般用断路器分组投切。(见并联电抗器)

动态无功补偿装置 包括同步调相机、静止补偿装置及静止无功发生器等。其特点是能自动快速连续平滑地调节出力,对动态无功负荷进行跟踪补偿。同步电动机进相运行及绕线式异步电动机同步化等,由于其调节幅度小,性能差,不能用作动态无功补偿装置。

同步调相机 专用于向电网供应或吸收无功的同步电机,其特点是出力调节幅度大,电压稳定性好,有较大的短时过负荷能力,能在电力系统故障电压下跌时强行励磁以支撑电压,提高系统稳定性。(见同步调相机)

静止补偿装置 由电容器、电抗器、晶闸管和调节器等静止设备组成的动态无功补偿装置(见图2中的CSR、SR、TCR、TCT、TSC、TSR)。与同步调相机相比,它的优点是调节速度快,功能多样化,运行可靠,

安装维修方便,噪声小,能耗低,发展适应性好以及不需大量冷却水等。缺点是电力系统故障电压下降时,其出力也要按电压平方的比例下降,需用增大设备容量的办法来弥补。静止补偿装置通常可分为五种型式:①可控饱和电抗器型静止补偿装置(CSR),它是用改变饱和电抗器控制绕组中的直流电流来改变电抗器的感抗,以调节其无功补偿功率的一种补偿装置;②自饱和电抗器型静止补偿装置(SR),是利用饱和电抗器自身的饱和伏安特性,并经适当的电容器校正,来自动调节其无功补偿功率的一种补偿装置;③晶闸管控制电抗器型静止补偿装置(TCR),是用反并联晶闸管与电抗器串联来调节其无功补偿功率的一种静止补偿装置,目前TCR在实际应用中最为普遍;④晶闸管控制变压器型静止补偿装置(TCT),是用反并联的晶闸管与高阻抗变压器串联来调节其无功补偿功率的一种补偿装置;⑤晶闸管投切电容器型静止补偿装置(TSC),是用反并联的晶闸管与电容器组及限流电抗器串联来投切电容器组以调节其无功补偿功率的一种补偿装置,能对电网无冲击地快速连续投切,适于频繁调节。此外,还有晶闸管投切电抗器型静止补偿装置(TSR),其一次接线与TCR相同,但只能级差调节,不能平滑调节。在实际应用中,不同型式的装置可灵活组合成混合式,以满足各种需要,其中基本的混合模式有TCR+FC、SR+FC及TCR+TSC三种。

静止无功发生器 利用半导体换流电路产生或吸收无功的一种新型发生器,它不需大量的电容器及电抗器,因此很有发展前途,但目前还处在原理研究及工业性试验阶段。(见静止无功发生器)

主要技术性能

各种并联补偿装置的主要技术性能比较见表3。

表3 各种并联补偿装置的主要技术性能比较

序号	比较项目	并联电容器		并联电抗器		同步调相机 (SC)	静止补偿装置 (CSR、SR、TCR、 TCT、TSC)	静止无功 发生器 (SVG)
		FC	BSC	ER	BSR			
1	起动	快	快	快	快	慢	快	快
2	动态响应时间 (ms)		40~100		40~100	100~400	TCR: 5~10, TCT、 TSC、SR: 10 ~ 20; CSR: 40~100	30~100
3	连续平滑调节 性能	不能调	间断不平	不能调	间断不平	连续平滑	TSC 连续不平, 其余 连续平滑	连续 平滑
4	调节无功能力	仅能供	仅能供	仅能吸	仅能吸	既能供, 又能吸	TSC 仅能供, 其余加 FC 能供能吸	能供 能吸

续表

序号	比较项目	串联电容器		并联电抗器		同步调相机 (SC)	静止补偿装置 (CSR、SR、TCR、 TCT、TSC)	静止无功发生器 (SVG)
		FC	BSC	FR	BSR			
5	短时过负荷能力 (倍)	1.43	1.43	1.5	1.5	强励下可达 1.3~2.0	SR 可吸 3~5, 其余 1.3~1.5	差
6	电压 $U$ 下降时的出力	按 $U^2$ 下降	按 $U^2$ 下降	按 $U^2$ 下降	按 $U^2$ 下降	$U$ 下降 5%~10%, 出力不变; 下降 >10%, 按 $U$ 减少	按 $U^2$ 下降	按设计
7	能否分相快速调节	不能	不能	不能	不能	不能	CSR、SR 不能, 其余均能	能
8	平衡三相电压能力	无	无	无	无	有限	TCR 好, TCT、TSC 有限, SR 略有, CSR 无	好
9	抑制电压闪变能力	无	无	无	无	有限	TCR、TCT、SR 好, TSC 有限, CSR 无	好
10	是否产生高次谐波	不产生	不产生	不产生	不产生	不产生	TSC 不产生, 其余均产生	产生
11	是否增加短路容量	不增加	不增加	不增加	不增加	增加	不增加	不增加
12	噪声	小	小	中	中	大	TSC 小, TCR、TCT 中, CSR、SR 大	小
13	运行维修	简便	简便	简便	简便	麻烦	简便	简便
14	可靠性	高	高	高	高	较低	较高	未定
15	能耗率 (%)	0.05~0.3	0.05~0.3	0.5	0.5	1.5~2.5	TSC0.3, TCR0.5~1.0, 其余 1.5~3.0	2.0~3.0
16	组合与发展适应性	好	好	中	好	差	中~好	中
17	基建条件要求	简单	简单	简单	简单	基础要求高, 需大量冷却水, 基建时间长	基础要求低, 可用风冷, 基建时间短	简单
18	投资	小	小	小	小	大	大	很大

用 途

并联补偿装置主要用于负荷补偿, 用于交流输配电系统, 用于超高压直流输电系统, 还可兼作滤波装置。

用于负荷补偿 其作用是: ①提高功率因数, 一般用并联电容器, 用户有同步电动机时也可使其进相运行发出无功, 个别也采用绕线式异步电机同步化等措施; ②调整电压; ③减少电弧炉、轧钢机等冲击性负荷引起的电压波动; ④抑制电压闪变; ⑤平衡电气机车、单相电炉等单相设备及电弧炉等三相设备不对称运行造成的三相不平衡电压。

用于交流输配电系统 其作用是: ①调相调压, 优

化无功潮流, 减少网损, 若用计算机对全网发电机电压、主变压器有载调压装置及各种并联补偿装置进行优化协调控制, 可使网损趋向最小; ②抑制输电线路空载、轻载及甩负荷时的工频过电压; ③提高电网静稳定、动稳定及暂态稳定裕度; ④抑制电网功率振荡及次同步振荡。

用于超高压直流输电系统 其作用是: ①补偿换流站所需的无功功率; ②稳定故障时及故障后的交流母线电压。

兼作滤波装置 滤除非线性负荷、大功率换流装置及静止补偿装置本身产生的高次谐波电流, 抑制交流电压的波形畸变。静止无功发生器也可用作有源滤波装置。

表 4 各种并联补偿装置的主要用途比较

	用途	并联电容器		并联电抗器		调相机	静止补偿装置					静止无功发生器 (SVG)
		FC	BSC	PR	PSR	(SC)	CSR	SR	TCR	TCT	TSC	
(一)	负荷补偿											
1	提高功率因数	●	●			●	●	●	●	●	●	●
2	调整电压	○	●			●	●	●	●	●	●	●
3	减少电压波动					○	●	●	●	●	●	●
4	抑制电压闪变					○		●	●	●	○	●
5	平衡三相电压					○		○	●	○	○	●
(二)	交流输配电系统补偿											
1	调相调压	●	●	○	●	●		●	●	●	●	●
2	抑制工频过电压			●	●	○		●	●	●		●
3	提高电网静稳定	○	○	○	○	●		●	●	●	●	●
4	提高电网动稳定					●			●	●	●	●
5	提高电网暂态稳定		○			●		●	●	●	●	●
6	抑制电网功率振荡					○		○	●	●	●	●
7	抑制电网次同步振荡								●	●	●	●
(三)	超高压直流输电系统补偿											
1	补偿换流站无功功率	●	●			●		●	●	●	●	●
2	稳定交流母线电压					●		●	●	●	●	●
(四)	兼作滤波装置	○					●	●	●	●	○	●

注：+加并联电容器；●主要用途，效果好；○次要用途，效果有限。

各种并联补偿装置的主要用途比较见表 4。

发 展 简 况

并联补偿是随着电力网的扩大,特殊负荷的出现,逐步发展起来的。早期由于电网小,所需的无功功率全部由发电机直接供应。直至 1895 年第一组用石蜡浸纸的并联电容器投入试运行,后因事故多而未能推广。其后改用油浸纸作介质制成并联电容器,于 1914 年投入运行,情况良好,于是得到迅速推广应用。与此同时,1913 年第一台 15 MV·A 的空冷调相机在美国加利福尼亚爱迪生公司、1928 年第一台 20 MV·A 户外氢冷调相机在美国特纳 (Turner) 变电所相继投入运行。静止补偿装置开始于 20 世纪 60 年代初,先研制出 CSR 型,之后英国 GEC 公司又研制出 SR 型,并于 1964 年在埃塞俄比亚一台电弧炉上投入运行以消除电压闪变,随后又把它应用到电网上。自 20 世纪 70 年代以来,晶闸管型静止补偿装置得到了迅速发展,先由瑞典 ASEA 公司研制出一套 60 MV·A TSC 型静止

补偿装置,于 1972 年在瑞典 Domnarvet 钢厂投运。之后,美国 GE 公司、瑞士 BBC 公司等又研制出 TCR 及 TCT 型静止补偿装置,并得到迅速推广。目前已有数以百计的静止补偿装置在世界各地运行,效果良好。国际大电网会议认为,将来除少数特殊情况外,静止补偿装置将取代同步调相机。此外,1981 年日本关西电力公司研制成一台 20 MV·A 静止无功发生器样机,经过 9 个月试运行,结果满意,证明是一种很有发展前途的无功电源。目前美、苏、德、意等国也在积极研制静止无功发生器。

中国应用并联补偿装置起始于 20 世纪 30 年代,50 年代开始制造并联电容器及空冷调相机。1978 年试制成第一台 60 MV·A 氢冷调相机,于 1982 年在长沙梨梨变电所投入运行。1978 年开始为轧钢机引进 CSR 型静止补偿装置,1981 年又为武汉 500 kV 凤凰山变电所引进二套 TCR+TSC+FC 的大型静止补偿装置。与此同时,电力科学研究院等单位先后在 1981 年及 1987 年联合研制成一套 5 MV·A 的 CSR 型及

一套 12.7 MV·A 的 SR 型静止补偿装置；西安电力机械制造公司已引进瑞士 BBC 公司的制造技术，并在 1990 年试制成一套 35 MV·A 的 TCR 型静止补偿装置。此外，华北电力学院和东北电力学院先后在 1985 及 1988 年研制出一台电压源型及一台采用可关断晶闸管元件的静止无功发生器。

参考书目

Miller T J E. Reactive Power Control in Electric Systems. New York: John Wiley & Sons, 1982

Torseng S. Shunt - connected Reactors and Capacitors Controlled by Thyristors. In: IEE PROC. Vol. 128, Pt. C, No. 6, Nov. 1981; 366~373

(马廷绪)

binglian diankangqi

**并联电抗器** (shunt reactors) 并联于电力网上用于吸收无功功率的一种线性电抗器。主要优点是结构简单，维护方便，运行可靠，工作噪声较低，损耗较小。缺点是不能调节，短时过负荷能力低。

**类型** 按绝缘和冷却介质不同，可分为油浸式并联电抗器和干式并联电抗器。按使用目的和连接方式不同，可分为直接接于超高压输电线路、主要为了限制工频过电压的经常投运的超高压并联电抗器，和接于超高压变电所主变压器第三绕组或高中压配电母线上、主要为了调相调压并可投切的高、中压（电压多在 60 kV 以下）并联电抗器。

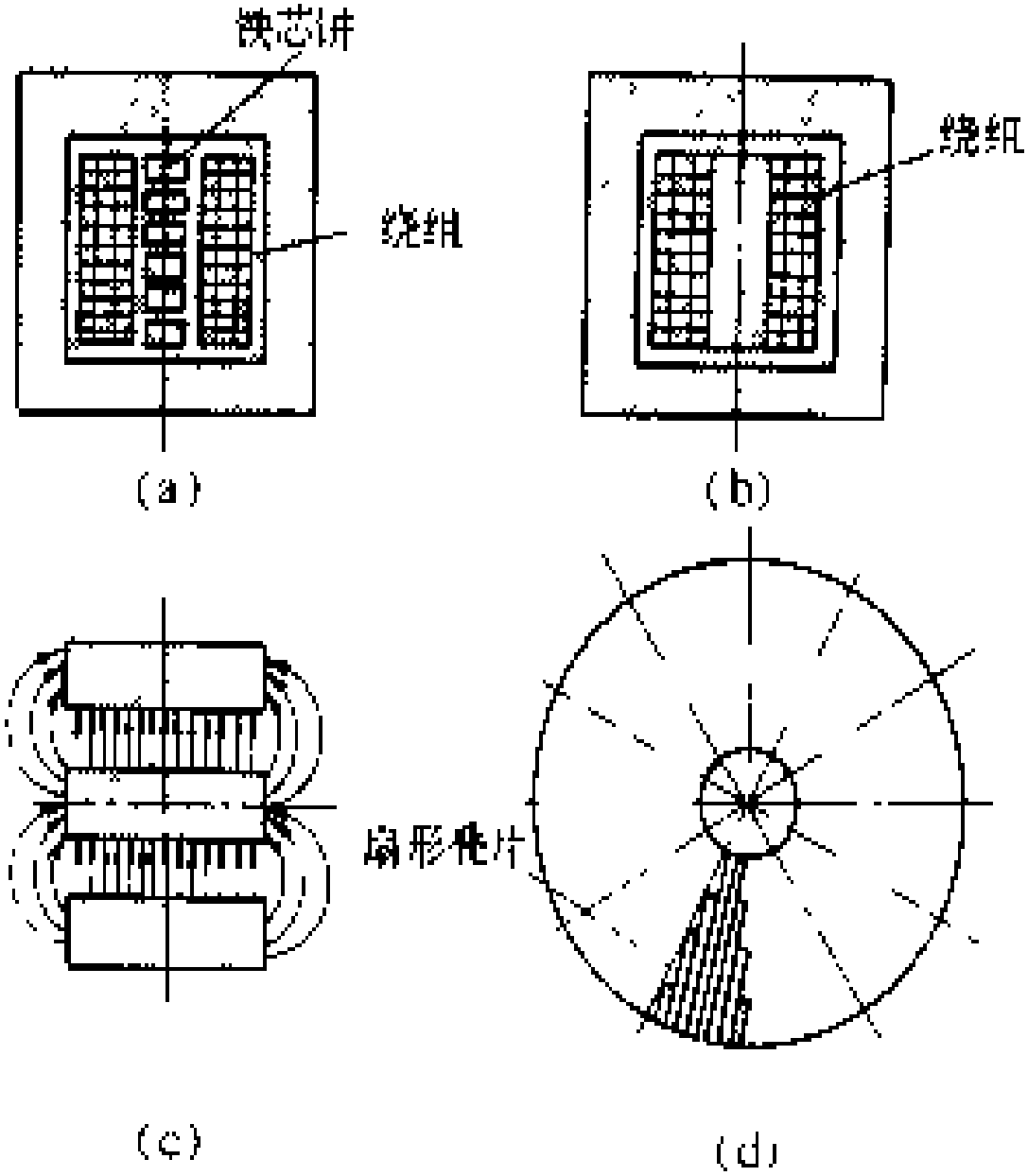
**油浸式并联电抗器** 能满足各种电压和容量的要求。超高压大容量的油浸式并联电抗器一般采用单相的，高、中压油浸式并联电抗器大多采用三相的。按有无铁芯柱油浸式并联电抗器又可分为铁芯式和空芯壳式（绕组内无铁芯，但有铁轭、边柱或磁屏蔽）。铁芯式的饱和电压低于空芯壳式的，而饱和以后电抗值的下降幅度则大于空芯壳式。油浸式并联电抗器的制造和运行经验比较成熟，容量相同时它的体积小于干式并联电抗器，占地面积也较小。但维护方面有一定工作量，还要配备必要的消防设施。空芯壳式制造简单，振动及噪声小，漏磁和附加损耗小，但因无铁芯柱，磁通密度低，用铜量大，体积大。

**干式并联电抗器** 既无铁芯、又无边柱的空心单相结构的并联电抗器。按目前的制造水平，其额定电压不能超过 69 kV。主要优点是：结构简单，每千乏的重量较轻，维护工作量少；电抗值恒定不变；无火灾危险。缺点是：安装时需满足相间及对地磁间隙距离的要求；占地面积较大；抗环境污染（灰尘、盐雾等）能力以及耐老化性能不及油浸式并联电抗器；设备制造和运行经验相对较少。

**基本构造** 油浸式并联电抗器与干式并联电抗器在结构上是不同的。

**油浸式并联电抗器** 由铁芯、绕组及其绝缘、油箱、套管、冷却装置和保护装置等组成。铁芯带有气隙或做成绕组内部没有铁芯的空心壳式结构，如图 (a) 及图 (b) 所示。

有气隙的铁芯由用硅钢片叠成的铁芯饼组装而成，铁芯饼间用许多弹性模数很高的硬质垫块（通常采用陶瓷或石质小圆柱）与铁饼粘结而形成气隙。大容量并联电抗器铁芯饼多采用扇形叠片组



油浸式并联电抗器结构

(a) 铁芯式；(b) 空心壳式；(c) 通过气隙的磁通；(d) 辐射式铁芯饼

装的径向辐射形式，以防止向外扩散的磁通有一部分垂直进入叠片而引起涡流过热，见图 (c) 及图 (d)。铁芯饼叠片组装压紧后，用无纬环氧玻璃丝带绑扎并经环氧树脂真空浇铸成整体。铁芯和铁轭用特殊千斤顶压成一个整体，或采用非磁性钢拉杆和弹簧压紧，以防铁芯在运行中因受脉动的磁拉力发生松动而引起振动和噪声。超高压大容量的油浸式并联电抗器多采用纠结式绕组，绕组与铁芯间装设若干层铝箔静电围屏。紧靠中柱的静电屏与铁芯夹件连接并接地。中等电压的大容量并联电抗器多采用由多股换位导线绕制的多层螺旋形绕组。参见彩图插页第 19 页 58 图。

(1) 单相油浸式并联电抗器。铁芯式并联电抗器的铁芯一般采用单柱旁轭式结构，中柱为有隙铁芯，二边柱为磁通返回柱，绕组装在中柱上。空心壳式并联电抗器的绕组固定在木制芯柱上，或将空芯绕组放置在上下铁轭、边柱或磁屏蔽中间。

(2) 三相油浸式并联电抗器。铁芯大多采用芯式结构，三相芯柱均为有隙铁芯，呈水平或三角形排列。三角形排列的铁芯，由于铁轭磁通仅为芯柱磁通的  $1/\sqrt{3}$ ，可节约铁轭材料并可减少损耗。

**干式并联电抗器** 绕组由若干层直径和匝数均不同的并联分流线圈包组成，每一线圈包是由多股导线（股间及导线外分别包以绝缘薄膜）绕制的单层螺旋形线圈经环氧树脂浸渍的连续玻璃丝带包扎并硬化后形成一个密封整体。各线圈包用环氧玻璃丝带绑扎或用机械夹紧的方法同心地固定在上下两个铝制星形接线

板间,各线圈包间以聚脂树脂浸渍的玻璃纤维垫条隔开,形成冷却风道。每一线圈包的两个导线端子,分别与上下接线板焊接。这种结构具有很高的机械强度,电抗器的轴向电压分布均匀,而线圈包间的径向电压差几乎为零。为防止线圈包的环氧玻璃纤维层在大气环境中的老化,特别是防止紫外线的辐射影响,在它的外表面用保护涂料(如硅醇酸脂)处理。电抗器绕组安装在具有支柱绝缘子的支座上。支座及所有附件,均由非磁性材料制式,以防漏磁引起局部过热。必要时还可采用环氧玻璃纤维绕制的圆筒形底座,它不但可防漏磁发热,还可提高接线端子对地安全距离,改善绕组下部通风和阻尼电抗器的振动。

**应用** 并联电抗器主要用于超高压输电线路、变压器的第三绕组或高、中压配电母线上,实现无功补偿的功能。

(1)用于超高压输电线路,其主要功能是:①在线路空载或轻载运行情况下吸收无功功率,控制电网最高运行电压不超过规定值,改善电网的无功潮流分布和降低线路损耗,降低同步操作时断路器两侧电压差;②在系统操作和故障情况下,限制工频过电压和操作过电压,降低系统绝缘水平;③防止发电机带空载长线时发生自励磁;④降低发电机功率因数,减少发电机进相运行,以提高系统的稳定性。

超高压并联电抗器在其中性点与地之间串接一小电抗器后(见中性点电抗器),还具有以下功能:①防止线路不对称开断时可能产生的谐振过电压;②限制潜供电流的电容分量,提高线路单相重合闸的成功率,有利于实现快速单相自动重合闸。

(2)用于变压器第三绕组或高、中压配电母线上,其主要功能是调相调压和改善无功潮流分布,防止线路轻载时系统电压过高,对降低线损和减少发电机进相运行也有一定作用。

**发展简况** 20世纪10~20年代起,并联电抗器在少数几个高压电网中已有应用,但使用情况并不普遍。50~60年代后,随着超高压输电系统的兴建和发展,并联电抗器的应用逐渐增多,制造和运行技术都有了很大发展。1971~1973年,美国电力公司建设的两条765 kV输电线路,都安装了并联电抗器进行无功补偿,这是迄今世界上最高电压的并联电抗器。1972年,中国330 kV刘家峡—关中输电线路(见刘家峡—关中输电线路)建成投产,揭开了中国应用并联电抗器的序幕。自1981年12月中国第一条500 kV平武线双凤段(见平武山—武昌输电线路)投运以来,华中、东北、华北和华东等地区的500 kV输电系统中,已有大量的并联电抗器投入运行。

传统的并联电抗器均为油浸式,20世纪60年代

起,加拿大的传奇电气公司和奥地利的特种电器公司等制造厂应用环氧树脂、玻璃纤维和聚脂薄膜等绝缘材料,研制开发了空心的干式户外型并联电抗器。70年代起,空心干式户外型并联电抗器逐渐得到应用和发展。目前已能制造单相容量达60 Mvar、额定电压达69 kV的干式并联电抗器。由于干式并联电抗器具有一定优点,在欧美已经获得广泛应用,而日本目前仍采用油浸式并联电抗器。

参见彩图插页第19页57图。

**参考书目**

[美]安德生等著,345千伏及以上超高压输电线路设计参考手册,电力工业部武汉高压研究所译,北京:电力工业出版社,1981  
(Anderson J G. Transmission Line Reference Book 345 kV and above. Electric Power Research Institute, 1975)

(冯宝忆)

binglian diankangqi jidian baohu

**并联电抗器继电保护** (shunt reactor relay protection) 并联电抗器故障或不正常运行时,为减轻其损坏程度和防止影响系统安全运行而采用的动作于跳闸或信号的自动装置。不同的电抗器所需的继电保护装置也不同。

超高压油浸式并联电抗器的继电保护一般包括:①瓦斯保护,作为各种内部故障的主要保护;②纵联差动保护,作为相间故障的主要保护;③零序电流差动保护,是反应电抗器出线侧与中性点侧三相电流零序分量之差的一种差动保护,当电抗器发生接地故障出现零序故障电流时保护动作,因此作为相间及接地故障的加强保护;④零序方向接地保护,作为匝间及接地故障的保护以及作为差动保护的后备保护,当电抗器发生匝间故障时,由于三相阻抗的不对称,将产生零序电压和零序电流(其动作方向指向电抗器内部)而使零序方向接地保护动作;⑤过电流保护,作为内部故障的后备保护;⑥过负荷保护;⑦制造厂配套供应的压力保护、油温保护、绕组温度保护及油位保护等。如果并联电抗器无专用断路器,则保护动作于跳线路两端的断路器。

高、中压油浸式并联电抗器的继电保护保护的配置除了不装设零序差动保护和零序方向接地保护(由于系统中性点和电抗器中性点均不接地)外,其余与超高压并联电抗器的保护配置基本相同。

干式并联电抗器的继电保护通常仅配置过电流及过负荷保护。接于超高压主变压器第三绕组上的干式并联电抗器如不装设总断路器,过流保护动作后则



将主变压器其他两侧跳闸，过负荷保护动作后则延时发信号。装于干式并联电抗器中性点与地之间的单相电压互感器二次侧的零序电压继电器，可作为监视主变压器第三绕组侧单相接地和电抗器匝间故障的保护，不过其灵敏度较低。

超高压并联电抗器中性点小电抗器的继电保护它在正常运行时仅有不平衡电流流过，故障机率小，可仅设瓦斯保护及过负荷保护，均动作于信号。瓦斯保护瞬时动作，过负荷保护延时动作。

(冯宝忆)

binglian diankangqi kongzhi zhuangzhi  
**并联电抗器控制装置** (shunt reactor control equipment) 将并联电抗器接入和退出系统的装置，包括断路器、负荷开关、隔离开关及有关的自动控制装置。不同的并联电抗器，所需的控制装置也不相同。

超高压并联电抗器的控制装置 为了限制工频过电压而安装的并联电抗器，一般仅装设隔离开关。并联电抗器的投切操作，需在线路停电后进行。如线路停电困难而工频过电压问题又不突出时，可选用负荷开关进行操作。在苏联，也有用火花间隙投运电抗器的实例。

高、中压并联电抗器的控制装置 由于调压调相的需要，并联电抗器通常被分成若干组，并在每组端部或中性点侧装设适于频繁操作的真空负荷开关或断路器进行控制。每组电抗器容量的选择，应使投切其中一

组时引起的电压波动足够小。各组电抗器的断路器通常装设按电压自动投切装置，当它的过电压继电器动作后，经一定时延起动，将各组电抗器按顺序投入；当它的正序电压继电器因电压下降起动时，则立即将各组电抗器按顺序切除，以保证故障切除后系统电压迅速恢复，防止电压崩溃。此外，还可装设连锁装置，当有关的超高压线路故障跳闸时，将全部电抗器连锁切除，以利于事故调压。在正常运行情况下，各组电抗器的投切，可由值班人员根据系统无功、电压的要求进行控制。接在超高压主变压器第三绕组上的并联电抗器一般不设置总断路器，这样可以节约投资，并降低变压器的阻抗，以提高电抗器的出力。为了减少主变压器第三绕组侧的相间故障概率，宜选用单相电抗器(如干式电抗器)，并在电抗器的中性点装设负荷开关或断路器。

(冯宝忆)

binglian diankangqi shiyan  
**并联电抗器试验** (shunt reactor tests)

在制造、出厂、交接、运行和检修中采用测试设备鉴定并联电抗器性能和质量的方法。按试验性质不同，可分为型式试验、出厂试验、交接试验、大修试验和预防性试验。根据国际电工委员会(IEC)及中国的有关规程标准，将油浸式并联电抗器的试验项目汇总列于下表。干式并联电抗器的试验可参照表中序号1、2、10、12、14、15、17及18项进行，此外还要增加支柱绝缘子的工频耐压试验项目。

油浸式并联电抗器的试验项目

序号	试 验 项 目	型式试验	出厂试验	交接试验	大修试验	预防性试验	备 注
1	测量绕组的直流电阻		✓	✓	✓	✓	
2	测量交流阻抗		✓	✓			
3	测量伏安特性、阻抗线性度及谐波分量	✓					按用户特殊要求进行
4	测量绕组绝缘电阻及吸收比		✓	✓	✓	✓	
5	测量绕组连套管的tgδ		✓	✓	✓	✓	
6	测量绕组连套管的泄漏电流			✓	✓	✓	仅对 500 kV 电抗器进行
7	测量轭铁和穿心螺栓以及铁芯(有引外接地)对地的绝缘电阻				✓	✓	预防性试验仅测试铁芯对地绝缘电阻
8	绕组连套管的交流耐压		✓	✓	✓		交接和大修根据试验条件进行
9	测量非纯瓷套管的tgδ		✓	✓	✓	✓	仅对 330 kV 及以上电抗器进行
10	绕组的匝间耐压试验		✓				
11	测量绕组的局部放电量		✓				仅对 330 kV 及以上电抗器进行

续表

序号	试 验 项 目	型式 试验	出厂 试验	交接 试验	大修 试验	预防性 试 验	备 注
12	雷电冲击耐压试验（包括全波和截波）	✓	✓				线端及中性端分别按标准进行试验
13	操作冲击耐压试验	✓					仅对 330 kV 及以上电抗器进行
14	测量电抗器的额定损耗		✓	✓			交接试验在有条件时进行
15	测量电抗器的额定温升	✓		✓			500 kV 电抗器交接时测油箱表面温度分布
16	测量电抗器在额定电压下的振动		✓	✓			
17	测量电抗器在额定电压下的噪声		✓	✓			
18	测量电抗器的过电压能力	✓					按用户特殊要求进行
19	绝缘油的各种理化性能试验			✓	✓	✓	
20	绝缘油的电气强度试验			✓	✓	✓	
21	测量绝缘油的 $\lg\delta$			✓	✓	✓	63 kV 及以上电抗器必须进行
22	油中溶解气体色谱分析			✓	✓	✓	
23	油中微量水测定			✓	✓	✓	仅对 330 kV 及以上电抗器进行
24	油中含气量测定			✓	✓		仅对 500 kV 电抗器进行

（冯宝忆）

binglian diankangqi yunxing jianxiu  
**并联电抗器运行检修**（shunt reactor operation and maintenance） 为保证并联电抗器长期安全运行而进行的运行中的巡视检查、维护、操作、事故处理和定期停电检查修理的工作。运行工作的主要内容是：巡视检查、定期维护、起停操作、异常运行和事故处理。检修工作的主要内容是：确定检修周期、项目和标准；检修前的施工准备，包括技术和组织措施；检修过程中的全面质量管理等。

油浸式并联电抗器运行 主要工作内容：①巡视检查，分为定期检查、特殊检查和投运前的检查。定期检查内容包括抄表（自动化变电所可采用计算机的自动安全监控检测装置）、设备外部检查和运行分析。主要检查项目为：套管油位、油色及积污情况，渗漏油及构件发热情况，特别要注意检查箱壁振动和噪声的发展情况。运行分析内容包括分析油和绕组温升与负荷及冷却介质温度的关系，油位与油温的关系，以及各种表计指示的相互关系等。当气象条件恶劣（如大雾、雷雨、结冰等）或故障时，需进行特殊检查。投运前的检查目的是为了确定电抗器是否具备带电投运条件。检修换油后应先放去油中残余空气并静置若干小时后才能投运，110 kV 及以上的油浸式并联电抗器还应进行绝缘湿度鉴定，合格后才能不经干燥投运。②定期维护，包括运行中的定期切换、校验和必要时加油、更换

硅胶等。③起停操作，一般按操作票制度执行，停电检修时还应做好隔离、接地等安全措施。④异常运行和事故处理，对异常运行现象应先查明原因，再设法消除，必要时需停电处理。自动跳闸时按事故处理规程中规定的程序进行处理。变电所的事件顺序记录仪和故障录波器，可以有效地帮助进行故障分析和处理。

油浸式并联电抗器的检修 对中国设备参照有关的运行规程进行。对外国产品按制造厂规定进行。根据是否吊芯或吊盖作内部检查，检修可分为大修和小修。如无特殊情况，具有胶囊密封的大容量并联电抗器在规定寿命期内（一般为 30 年）一般不必进行大修，仅需每年进行一次小修。小修的主要内容是：清扫套管，紧固其引出线接头；处理渗漏油等缺陷；校验各种仪表；油箱、散热器检修涂漆；进行预防性试验。

干式并联电抗器运行检修 运行工作与油浸式并联电抗器的基本相同。干式并联电抗器仅需进行小修。小修的主要内容是：检查清扫绕组，必要时补漆；检查和处理附件的绑扎紧固情况；检查焊接及端子板接触情况；清扫支持绝缘子；进行预防性试验。

（冯宝忆）

binglian dianrongqi  
**并联电容器**（shunt capacitor） 并联在电力网上以供给无功功率的电容器。与同步调相机相

比,其主要优点是投资省,能耗低,结构简单,运行可靠,维护方便,体积小,单位容量小,可按需要组合,分散安装,就地补偿无功,运行无噪声,不需冷却水等。缺点是无功出力不能平滑调节,在电网电压下跌时,其无功出力按电压平方的比例下降。

**主要类型** 按电极形式不同,并联电容器可分为箔电极并联电容器和蒸镀电极并联电容器两大类。箔电极并联电容器按其介质不同又分为纯纸介质、膜纸复合介质和纯膜介质并联电容器三种;蒸镀电极并联电容器按其介质不同分为金属化纸和金属化膜电容器。并联电容器还可按外壳结构不同分为罐式和箱式并联电容器两种。箔电极并联电容器的特点是以 $5\sim 15\mu\text{m}$ 厚的铝箔作电极,内部用液体介质浸渍。蒸镀电极并联电容器的特点是在电容器纸或聚丙烯薄膜等的表面上直接蒸镀一层 $5\times 10^{-3}\sim 5\times 10^{-2}\mu\text{m}$ 厚的锌或铝作电极,当纸或膜击穿时,击穿点周围的镀层会瞬间蒸发掉,使绝缘立即恢复,仍可继续使用,即所谓具有自愈能力,一般一次击穿自愈仅减少元件电容量的 $0.0001\%$ ,所以其使用场强可选得比箔电极电容器高。蒸镀电极电容器广泛适用于低压。

**纯纸介质并联电容器** 固体介质全部采用电容器纸的箔电极并联电容器,主要适用于低压。优点是成本低,制造容易。缺点是损耗大,约 $2\sim 3\text{ W/kvar}$ ,比特性差,约 $2\text{ kg/kvar}$ 。纯纸介质并联电容器有逐步被淘汰的趋势。

**膜纸复合介质并联电容器** 固体介质采用塑料薄膜与电容器纸交替搭配而成的箔电极并联电容器,有两膜三纸、两膜两纸、两膜一纸和两纸一膜等不同的固体介质结构,一般适用于高压。优点是损耗小,约 $0.5\sim 1\text{ W/kvar}$ ,比特性好,约 $0.3\sim 0.5\text{ kg/kvar}$ 。缺点是制造复杂,工艺要求高。

**纯膜介质并联电容器** 固体介质全部采用塑料薄膜(常用聚丙烯粗化膜)的箔电极并联电容器。优点是损耗很小,仅 $0.1\sim 0.2\text{ W/kvar}$ ,比特性很好,仅 $0.2\text{ kg/kvar}$ ,耐压高,温升低。缺点是制造工艺要求严格,固体介质不易被浸渍,真空度及净化条件要求很高。

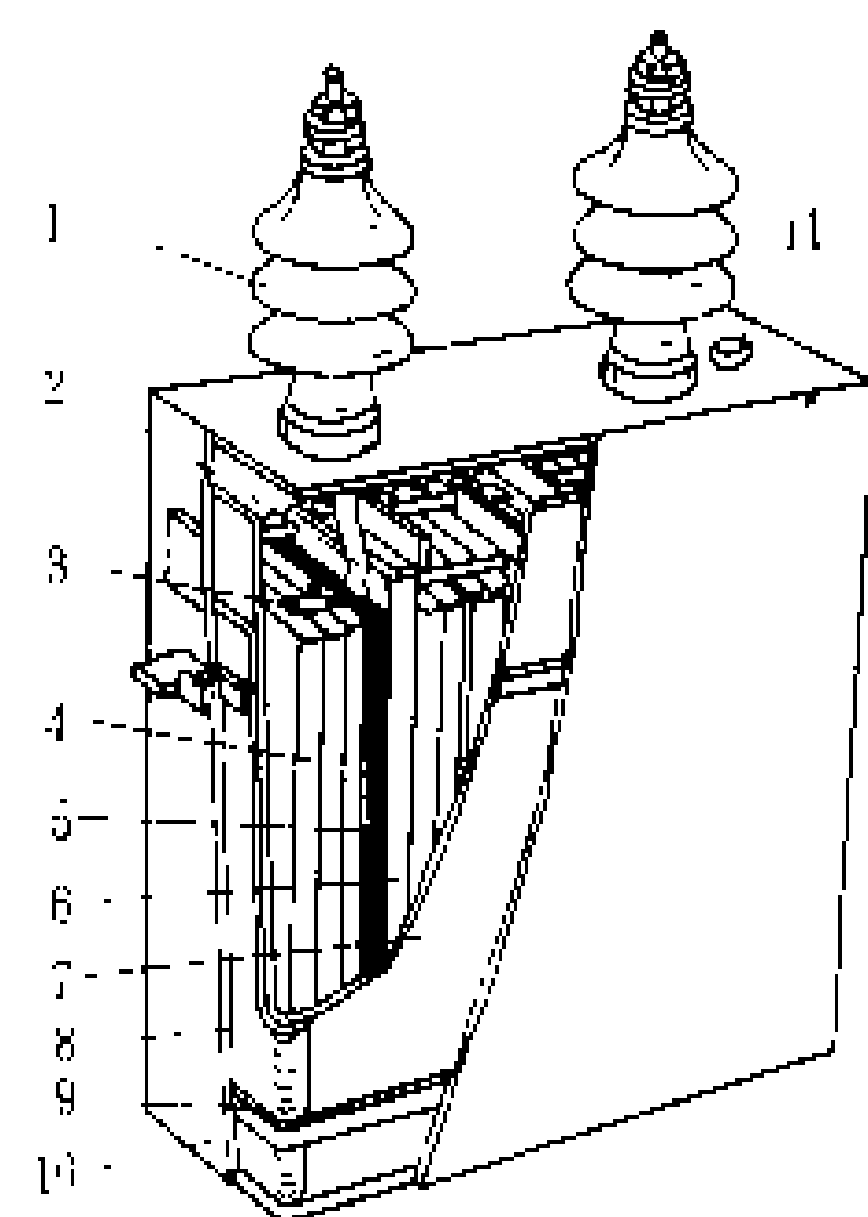
**金属化纸并联电容器** 浸渍式蒸镀电极并联电容器,性能不如金属化膜并联电容器,已逐步被淘汰。

**金属化膜并联电容器** 不需浸渍的干式蒸镀电极并联电容器,其结构简单,损耗小,比特性好,是低压并联电容器发展的主流。

**罐式并联电容器** 外壳采用薄钢板焊接成罐式结构的并联电容器,其单台容量最大为 $400\text{ kvar}$ 。

**箱式并联电容器** 外壳采用厚钢板焊接而成并装有油量调整装置以调整油量随温度变化的并联电容器,其单台容量最大达 $20\text{ Mvar}$ 。

**基本结构** 箔电极并联电容器的结构如图所示,它主要由芯子、外壳和出线结构三部分组成。芯子主要由若干元件按一定的设计要求串、并联而成。元件由一定厚度及层数的固体介质和铝箔电极卷绕一定卷数后压扁而成。常用的固体介质有电容器纸、塑料薄膜或纸与膜搭配复合。铝箔有的采用激光裁切或边沿折边,边端外露,元件间连



箔电极并联电容器的结构

接采用机械压接和表而压花等措施,以降低电极边缘电场强度,改善元件散热、元件连接和固体介质层间的浸渍条件。外壳采用薄钢板焊接制成。出线套管为密封式,在外壳法兰和端帽处,采用表面涂敷金属层,然后以钎焊焊接,或用硅橡胶密封固定等办法进行密封。将通过预烘并经检查合格的芯子与外壳及出线结构装配好后,再经真空干燥、浸渍处理和封口等工序,即成电容器。

1—出线套管;2—出线连接片;3—连接片;4—元件;5—出线连接片固定板;6—组间绝缘;7—包封件;8—夹板;9—紧箍;10—外壳;11—封口盖

**金属化纸并联电容器的结构** 除电极采用纸蒸镀金属外,其余部分与箔电极并联电容器基本相同。金属化膜并联电容器由于是干式,用于低压,无需密封,所以结构更简单。有的电容器内部还在元件上装有内部熔丝,在出线头之间装有放电电阻。

**用途** 并联电容器是目前使用最多的一种无功补偿装置,它的主要用途有:①装设于用户负荷处、配电线路中或高中压变电所内,以改善功率因数及电压质量;②装设于枢纽变电所内,用真空负荷开关或六氟化硫断路器分组投切,以控制电网电压,提高电网静态稳定性;③用于超高压直流输电系统,以补偿换流站所需的无功功率;④与各种静止补偿装置配套使用,并兼作滤波器。

**发展简况** 1895年,第一组用石蜡浸纸的并联电容器投入试运行,因事故多而未能推广。到1914年,美国试制成合格的油浸纸绝缘并联电容器,并在电网中试用。其后在第一次世界大战期间,并联电容器发展很快。20世纪30年代,氯化联苯浸渍剂问世后,由于其化学性能稳定,电气性能优越,不易燃烧等优点,很快被世界各国的电容器厂所采用。氯化联苯电容器稳定生产了30多年,到60年代中期后,由于认识到氯化联

苯的毒性,有些国家开始禁止生产,并相继发展新的浸渍剂来替代氯化联苯。目前国际上公认且应用较多的新浸渍剂有 6 种:二方基乙烷、异丙基联苯、爱迪索油、CPEKIS 1000、UGILECC 100、BAYLECTROL 4900。这些新浸渍剂的毒性小,技术性能好,尤其后三种浸渍剂适用于纯膜电容器。在固体介质方面,20 世纪 40 年代开始采用聚苯乙烯薄膜,到 60 年代中期开始采用聚丙烯薄膜与纸复合介质生产电容器,到 70 年代中期,又开始发展纯膜电容器。目前纯膜电容器已成为世界各国并联电容器发展的主流,其中高压电容器采用新型浸渍剂,低压电容器采用金属化膜,干式,不需浸渍。中国的并联电容器应用起始于 20 世纪 30 年代,50 年代上海电机厂的一个车间开始生产电容器,到 1957 年和 1969 年,西安电力电容器厂和桂林电力电容器厂相继投产。至今,在中国有一定生产能力的电力电容器生产厂已发展到十多家。

参考书目

刘乾业, 电力电容器安装运行和检修, 北京: 电力工业出版社, 1980

(徐维钧 马廷绪)

binglian dianrongqi shiyan

并联电容器试验 (shunt capacitor tests)

在制造、出厂、交接、运行和检修中采用测试设备鉴定并联电容器性能和质量的方法。按试验性质不同,一般分为型式试验、出厂试验、交接验收试验、预防性试验四种。根据国际电工委员会 (IEC) 及中国有关规程和标准的规定,并联电容器的试验和检查项目如表所示。

并联电容器的试验和检查项目

序号	项 目	型式试验	出厂试验	交接验收试验	预防性试验
1	外观检查		✓	✓	✓
2	密封性试验		✓		
3	电容测量		✓	✓	✓
4	额定耐压试验		✓	✓	
5	极对外壳工频耐压试验 (干试验)		✓	✓	
6	介损损耗角正切 tgδ 测量	✓*	✓	✓	✓
7	内部放电电阻测量		✓		
8	热稳定试验	✓			
9	极对外壳工频耐压试验	✓**			

续表

序号	项 目	型式试验	出厂试验	交接验收试验	预防性试验
10	雷电全波冲击试验	✓			
11	短路放电试验	✓			
12	局部放电试验	✓			
13	极对外壳绝缘电阻测试				✓

\* 热稳定试验结束时测量。  
\*\* 对户内型电容器进行干试验,对户外型电容器在人工淋雨下进行湿试验。

(徐维钧)

binglian dianrongqizu chengtao zhuangzhi

并联电容器组成套装置 (shunt capacitor bank complex)

将电容器组及其所需的一、二次配套设备全部在工厂中组装好,能够成套供应的装置。与现场组装相比,其优点是利于产品标准化、系列化,保证组装质量,节约人工劳动,缩短现场安装周期,节省工程投资,提高经济效益等。根据环境条件及使用要求的不同,并联电容器组成套装置一般有屋外式、半露天式(即屋外搭遮阳棚)和屋内式三种。并联电容器组成套装置有以下特点:①按无功就地补偿及区分电压等级的原则进行合理配置;②成套性强,组合配套件具备标准化、系列化和完整化;③技术配套,在主接线、电容器选型、保护方式、限制涌流、限制谐波过负荷、限制重燃过电压以及自动控制等方面,进行全面综合考虑,做到合理、完善和可靠;④装置结构的组合设计紧凑、简单。并联电容器组成套装置一般包括以下设备及附件:①并联电容器及单台熔断器;②断路器、隔离开关或组合柜体;③串联电抗器、放电装置或组合柜体;④继电保护装置和信号装置;⑤自动投切装置及测量仪表;⑥金属氧化物避雷器;⑦其他按实际需要的附件,如电容器台架、网状遮栏及遮阳棚等。

(徐维钧)

binglian dianrongqizu jidian baohu

并联电容器组继电保护 (shunt capacitor bank relay protection)

并联电容器组在故障或不正常运行时,为减轻其损坏程度和防止影响系统安全运行而采用的动作于跳闸或信号的自动装置。一般可分为电容器内部故障保护、相间短路与过负荷保护、过电压与低电压保护三种。

内部故障保护 当电容器内部故障发展到一定程度时动作,将故障电容器隔离或切除,以防止电容器外壳爆炸。分为单台熔断器保护和内部故障继电保护两

种。

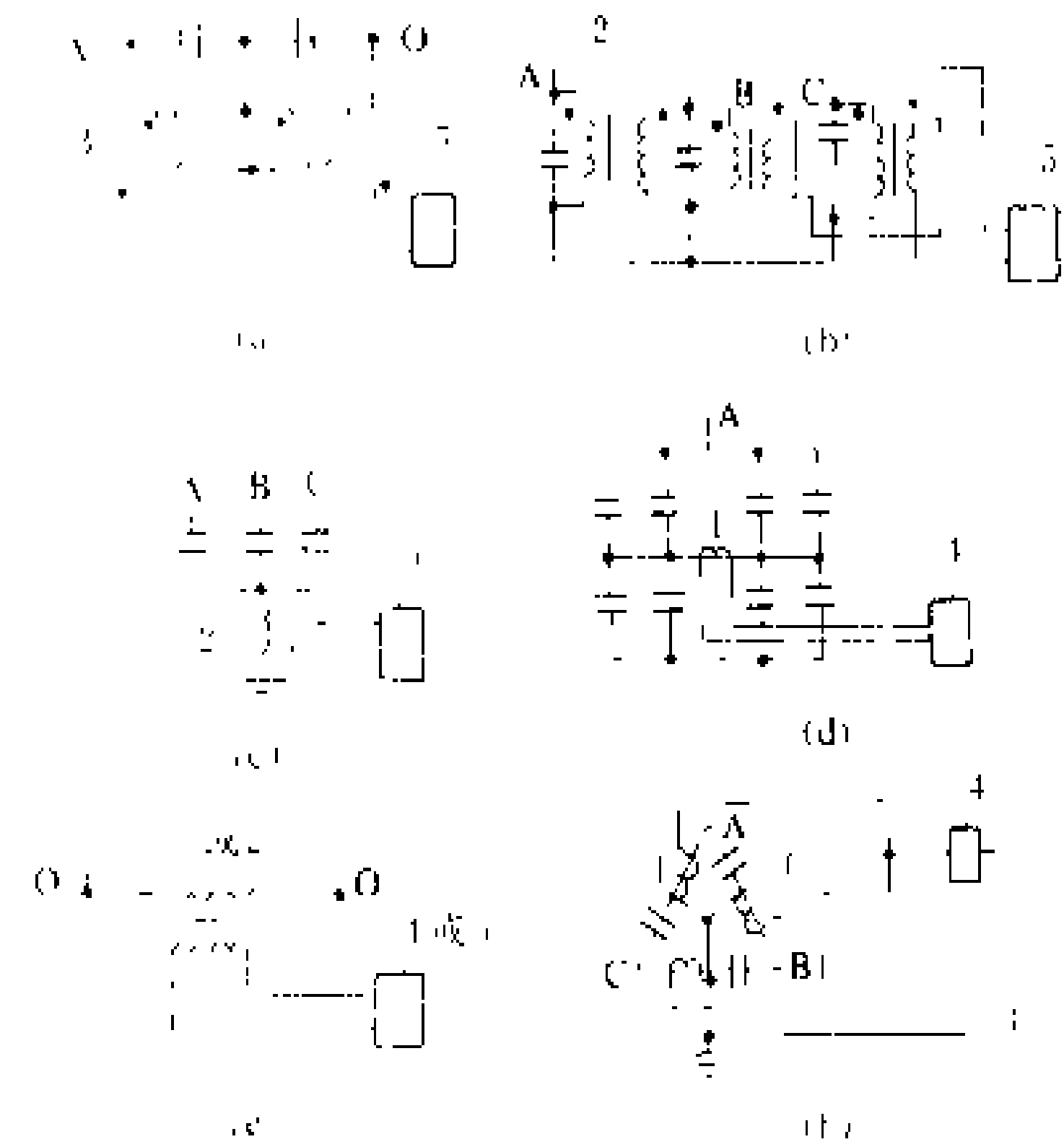
**单台熔断器保护** 将单台熔断器安装在电容器的电源侧,当电容器内部发生故障时,熔断器动作,熔丝被熔断,从而将故障电容器隔离,是防止电容器外壳爆炸的一种主要保护。选择熔断器的一般原则是:①在长期通过 1.43 倍电容器额定电流时不应熔断;②通过相当于 100 倍电容器额定电流的短时合闸涌流时不应熔断;③电容器内部元件击穿 50%~70%时能可靠熔断;④熔断器的安秒特性应与电容器外壳的爆裂特性相配合,以确保电容器外壳不爆裂;⑤电容器击穿时能可靠地切断工频过电流和与其并联的其他电容器的放电电流,以保证电容器不爆裂。可供选用的熔断器有喷逐式、限流式和喷逐与限流复合的万能式三种。喷逐式熔断器的断路容量较小,但结构简单,价格便宜,故使用最多。通常首先考虑选用喷逐式熔断器,如果其断路容量不能满足要求,再选用后两种。

**内部故障继电保护** 常用的有单星形接线电压差动保护、单星形接线开口三角电压保护、单星形接线零序电压保护、单星形接线桥式电流差动保护、双星形接线中性点电压不平衡保护或中性点电流横联差动保护、三角形接线零序电流保护等。其保护配置方式如图所示。内部故障继电保护一般动作于跳闸,从而切除电容器组,因此其整定值需尽可能与单台熔断器相配合。

**相间短路与过负荷保护** 常由带速断的反时限过电流继电器构成。相间短路时瞬时动作于跳闸,电容器过负荷超过规定时延时动作于信号或跳闸。

**过电压与低电压保护** 过电压保护由高返回系数、高精度的电压继电器构成,当运行电压超过允许值时动作于信号或跳闸。一般在以下两种情况下还应考

虑加装低电压保护:①母线电源中断随即重合闸,电容器组的残压大于 10%额定电压时;②母线失电或电压急剧下降导致大量甩负荷,当电压突然恢复,由于轻载变压器带大量电容器负荷,有可能产生不允许的工频过电压时。



几种并联电容器内部故障继电保护配置示意图  
(a) 单星形接线电压差动保护; (b) 单星形接线开口三角电压保护; (c) 单星形接线零序电压保护; (d) 单星形接线桥式电流差动保护; (e) 双星形接线中性点电压不平衡保护或中性点电流横联差动保护; (f) 三角形接线零序电流保护  
1—电流互感器; 2—电压互感器; 3—放电绕组或互感器; 4—电流继电器; 5—电压继电器

几种常用的并联电容器组保护的主要功能比较见表。

几种常用并联电容器组保护的主要功能比较

序号	保护方式	能防止电容器爆炸	能限制无功减少	需立即停运处理	能指示故障单元	能指示故障相、组	不受外界干扰
1	单台熔断器保护	✓	✓		○	○	○
2	单星形接线电压差动保护	○		○		○	○
3	单星形接线开口三角电压保护	○		○			○
4	单星形接线零序电压保护	○		○			
5	单星形接线桥式电流差动保护	✓		○		○	○
6	双星形接线中性点电流横联差动保护	✓		○			○
7	三角形接线零序电流保护	○		○			○
8	过电流保护			○			○

注: ✓—对, 效果好; ○—对, 效果一般。

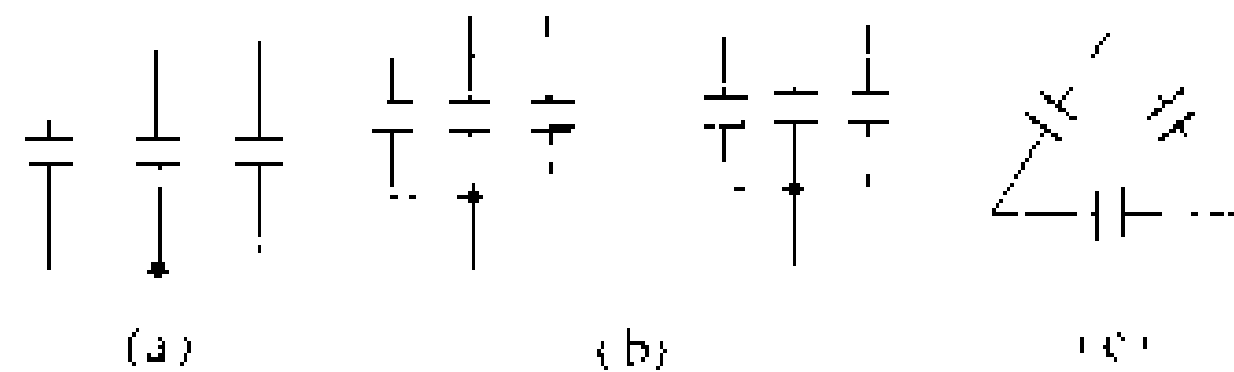
(徐维钧)

binglian dianrongqizu jiejian  
**并联电容器组接线** (shunt capacitor bank

connection) 将并联电容器连接成三相电容器组的接线方式。选择不同的接线方式时,要考虑电容器



的额定容量能否得到充分发挥,继电保护是否简单可靠,电容器内部故障时的后果及基建投资等因素。并联电容器组接线通常有单星形接线、双星形接线和三角形接线三种,如图所示。



并联电容器组接线  
(a) 单星形; (b) 双星形; (c) 三角形

**单星形接线** 电容器的一端分别接向各相电源,另一端连接在一起构成三相中性点的接线,如图(a)所示。单星形接线的优点是:接线简单,投资省,有多种保护方式,并且当任一台电容器被击穿时,故障电流都将受到限制,一般不会导致电容器爆炸。缺点是:当一相中的一台电容器被击穿时,如不加以隔离,将使其他两相电容器严重过电压。单星形接线方式适用于中型电容器组。

**双星形接线** 由两个单星形接线的并联电容器组并联连接而成的接线,如图(b)所示。与单星形接线相比,双星形接线的突出优点是:可在两组电容器的中性点连线上加装简单且十分灵敏可靠的电流或电压不平衡保护。缺点是:接线复杂,占地大。双星形接线方式适用于大型高压电容器组。

**三角形接线** 任一电容器的两端分别与两相邻电容器的一端连接而成三角形的接线,如图(c)所示。三角形接线的优点是:接线简单,投资省,每一电容器的运行电压与其它两相电容器的状况无关。缺点是:当每相只有一个串环节时,任一台电容器被击穿都会造成两相短路,故障电流很大,容易引起电容器爆炸,如果采用单台熔断器进行保护,又要求其断流容量需足够大,不经济。三角形接线方式适用于短路容量较小处的小型电容器组。

参考书目

刘乾业. 电力电容器安装运行和检修. 北京: 电力工业出版社, 1980

(徐维钧)

binglian dianrongqizu kongzhi zhuangzhi

**并联电容器组控制装置** (shunt capacitor bank control devices) 将并联电容器组投入或退出电力系统的装置,包括断路器、负荷开关及有关的自动控制装置。控制装置除部分操作次数少采用手动控制外,其余都采用自动控制。

**断路器、负荷开关** 要求频繁投切的宜使用真空

断路器、真空负荷开关或六氟化硫断路器;不要求频繁投切的可使用少油断路器。

**自动控制装置** 按控制参量不同,一般可分为按时间控制、按功率因数控制、按电压控制、按电压与时间复合控制、按无功电压局部优化控制和用计算机集中优化控制等六种自动控制装置。

**按时间控制** 采用音片钟做时间控制器,可用于负荷稳定按一定规律变化的场合。

**按功率因数控制** 采用功率因数自动控制器控制,适用于高低压工业用户,使功率因数保持在规定范围内。

**按电压控制** 采用两只极化继电器及阻容元件等构成电压检测回路,由一套继电器组成自动投切电路,一般用于地区电网的二次变电所,使母线电压保持在规定的范围。如变电所内同时装有有载调压变压器,则应对它们进行协调控制,即当母线电压低于下限时,先投入电容器组,如电压仍低于下限,则令有载调压变压器升压,直至电压符合要求;当母线电压高于上限时,先使有载调压变压器降压,如电压仍高于上限,则令撤出电容器组。协调控制的目的是在保证电压质量的前提下,提高电容器组的利用率。

**按电压与时间复合控制** 采用DZ型自动控制器进行电压与时间控制,一般用于地区电网的二次变电所,将变电所的典型负荷曲线划分为高峰和低谷负荷时段,按不同时段的不同电压要求进行控制,以起到部分逆调压的作用。

**按无功电压局部优化控制** 采用无功、电压综合控制器进行控制,用于电力系统的枢纽变电所或一次变电所。按无功、电压协调控制有载调压变压器、并联电容器组和其他无功补偿装置,做到变电所无功功率基本就地平衡,供电电压维持在规定的水平,线路损失趋向最少,从而实现局部地区的电压与无功功率优化控制。

**用计算机集中优化控制** 利用电子计算机,对电力系统内的发电机电压、有载调压变压器、可投切的并联电容器及其他无功补偿装置,进行集中优化协调控制,使在保证电压质量的同时,做到无功功率潮流优化,线路损失趋向最少。一般用于电力系统或地区电网的中心调度所。

(徐维钧)

binglian dianrongqizu yici peitao shebei

**并联电容器组一次配套设备** (primary circuit auxiliaries of shunt capacitor bank)

与并联电容器组配套的所有一次设备。通常包括单台熔断器、断路器、负荷开关、串联电抗器、放电装置、

金属氧化物避雷器及互感器等。一次配套设备的长期允许电流应至少为电容器组额定电流的 1.5 倍,并满足正常运行、短路故障及操作过程的要求。

单台熔断器 见并联电容器组继电保护。

断路器、负荷开关 用来实现电容器组的投切操作,其选择原则是:①分闸时不应重燃,以免引起过电压;②能承受合闸涌流所产生的电动力,并有足够的热稳定性,尤其是在母线上已接有电容器组的情况下合闸。一般在要求频繁操作的情况下,宜使用真空断路器、真空负荷开关或六氟化硫断路器;操作次数少的,可使用少油断路器。

串联电抗器 串联在电容器回路中用于限制合闸涌流和抑制高次谐波的电抗器。按电抗值分,有 6%  $X_c$  和 0.1%~2%  $X_c$  两种,其中 0.1%~2%  $X_c$  的小电抗只能用于限制合闸涌流。按结构分,有油浸铁芯电抗器和空心电抗器。(见限流电抗器)

放电装置 有专用放电绕组和电压互感器两种,其性能应满足:①最大放电容量下的热稳定要求;②二次负荷及电压变比误差的要求;③放电特性的要求:对手动投切的电容器组,应能在 10 min 内使电容器组上的剩余电压降至 75 V 以下,对可能在很短时间间隔内投切的电容器组,应能迅速将剩余电压降至电容器组额定电压的 10% 及以下。

金属氧化物避雷器 用于保护并联电容器组免受因频繁投切、断路器重燃而产生的操作过电压的危害,使用时应校验其通流容量。(见金属氧化物避雷器)

双星形中性线电流互感器 用来构成中性点电流横联差动保护,应选用匝绝缘加强型产品或在一次侧并联低压金属氧化物避雷器。(见电流互感器)

(徐维钧)

binglian dianrongaizu yunxing weihu

**并联电容器组运行维护** (shunt capacitor bank operation and maintenance)

为保证并联电容器组的安全经济运行而进行的巡视检查、投切操作、异常运行和事故处理以及定期维护等工作。

并联电容器组的运行 包括巡视检查、投切操作、异常运行和事故处理三个方面。

(1) 巡视检查。一般分为定期检查、特殊检查和投运前的检查。定期检查内容包括仪表监视、设备外部检查和运行分析。其中仪表监视主要是对运行电压、电流和温度的监视,要严格控制电容器的各运行参数,使其在制造厂所提供的允许范围内;设备外部检查项目主要有外壳是否鼓肚、渗漏,套管是否清洁、完整,引线连接处有无松动、发热、变色现象,有无异响,熔断器是否熔断,配套设备及通风设施运行是否正常;运行分

析主要是对巡视中发现的问题进行分析,如外壳轻微鼓肚、熔断器熔断等。当气象条件恶劣(如大雾、雷雨、冰雪、高温等)或发生故障时,需进行特殊检查。投运前的检查目的是为了确定设备是否具备带电投运条件。

(2) 投切操作。除自动投切操作外,一般由值班人员根据调度部门颁发的电压曲线进行。

(3) 异常运行和事故处理。最常见的异常运行情况是渗漏油、外壳鼓肚、熔断器熔丝被熔断、电容器爆炸以及小动物造成闪络、污闪事故等。渗漏油会使电容器内油面下降,潮气进入,导致内部放电击穿,故应及时处理或将电容器撤出。对外壳鼓肚情况,要分清是正常的热鼓冷缩,还是内部有故障产生气体所致。简单的区分办法是看是普遍鼓肚还是个别鼓肚,普遍鼓肚一般属正常现象,也可能由于环境温度过高所致,个别鼓肚可能有内部故障,宜将鼓肚的电容器停用半天,看其是否能恢复正常,如不能则应将其撤出。熔断器熔丝被熔断时,应首先检查电容器是否鼓肚,如没有鼓肚,则应检查熔断器是否由于端子接触不良,热容量不够或元件质量不好而熔断,必要时也可在调换熔丝后继续投用,并加强监视。发生爆炸、污闪等事故时,应按事故处理规程规定的程序进行处理。

并联电容器组的维护 并联电容器的日常维护工作量较少,主要是定期清扫,油漆,检查电容器渗漏油、外壳鼓肚以及各连接部分的紧固等情况,并进行必要的处理,同时对其配套附属设备进行必要的维修和测试。清扫周期可根据周围环境的污染情况及季节性特点来确定。

(徐维钧)

bo bianxing

**波变形** (wave distortion)

电磁波在传播过程中由于某种原因使得波的形状改变的现象。波变形常和波衰减同时发生。当幅值很高的冲击波沿导线传播时,波变形主要由冲击电晕引起。电磁波沿有损导线传播时,如果线路参数不满足  $\frac{G_0}{C_0} = \frac{R_0}{L_0}$  (其中  $G_0$ 、 $R_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$  分别为导线单位长度的对地电导、电阻、电感和电容)的条件,或电磁波沿无损导线传播且部分电流经大地返回而大地为非理想导体时,都会产生波变形。(见相模变换法)

(陈慈萱)

bo shuaijian

**波衰减** (wave attenuation)

电磁波在传播过程中由于各种损耗引起的各点电压值下降的现象。电磁波沿导线传播时,导线的电阻损耗、导线对地



的电导损耗、大地的损耗(当以地为返回回路时)以及导线的电晕损耗都可以引起波衰减。当幅值很高的冲击波沿导线传播时,波衰减主要由冲击电晕引起,且正冲击波比负冲击波衰减快,截波比全波衰减快。  
(陈慈荃)

bosu  
**波速** (surge velocity) 特指电磁波传播的速度,通常用  $v$  表示。当电磁波沿导线传播时,如果略去导线及大地的电阻,则  $v$  值只取决于导线周围介质的导磁系数  $\mu$  和介电常数  $\epsilon$ ,可写成公式  $v=1/\sqrt{\mu\epsilon}$ ,与导线的尺寸无关。电磁波沿架空线传播时的波速即为真空中的光速  $c(3\times 10^8\text{m/s})$ 。电磁波沿电缆传播时的波速约为  $c/2(1.5\times 10^8\text{m/s})$ (见相模变换法)。如果计及大地电阻,由于在导线周围存在空气和大地两种介质,这时电磁波在导线中的传播可出现多种波速。  
(陈慈荃)

bozulang  
**波阻抗** (surge impedance) 电磁波沿线路单方向传播时,线路任一点的电压值和电流值之比,简称波阻。在不计线路的损耗时,波阻抗  $Z$  可根据导线单位长度的电感  $L_0$  和单位长度的电容  $C_0$  计算, $Z=\sqrt{L_0/C_0}$ 。500kV 及以下架空线的波阻抗约为 300~500 $\Omega$ ,电缆的波阻抗约为 10~50 $\Omega$ 。当电磁波为前行波(见行波)时,波阻抗取正值;当电磁波为反行波(见行波)时,波阻抗取负值。  
在交流远距离输电线路中,若不计线路的损耗,当线路末端的负荷阻抗等于波阻抗时,线路上各点的电压和电流的绝对值都相等。此时沿线路输送的功率称

为线路的自然功率  $P_N$ ,  $P_N=U_N^2/Z$ ,式中  $U_N$  为线路的额定电压, $Z$  为线路的波阻抗。减少线路的波阻抗,可以增大交流远距离输电线路的最大传输功率。  
(陈慈荃)

buchangfa  
**补偿法** (compensating method) 见接地电阻测量。

budiliu dianlan  
**不滴流电缆** (mass impregnated non-draining cable, MIND cable) 一种用纸带绕包在导线上浸渍剂不易流动的纸绝缘电力电缆。它克服了粘性浸渍纸绝缘电缆滴油的缺点,一般用在 35kV 级及以下的电力电缆线路中。由于绕包纸带的结构不同,它可分为带绝缘电缆和分铅型电缆。  
不滴流电缆采用了在运行温度下几乎不流动的高粘度浸渍剂,有些制造厂在选定的矿物油中,还添加了石蜡或聚乙烯粉,以提高浸渍剂的粘度。有些制造厂改变了工艺,将纸带先干燥并浸渍了绝缘剂,然后绕包在导线上,生产了预浸渍纸绝缘电缆。不滴流电缆即使在较高工作温度(70~85 $^{\circ}\text{C}$ )时,浸渍剂也不会滴落。不滴流电缆在外观上和粘性浸渍纸绝缘电缆相似,但可用在高差较大的电力电缆线路中。为了区别于粘性浸渍纸绝缘电缆的简称,不滴流电缆常简称为 MIND 电缆。

不滴流电缆是 20 世纪 40 年代为了改进粘性浸渍纸绝缘电缆性能而发展起来的,但它的性能不及在 60 年代发展起来的固体挤压聚合电缆,因此近年来已逐渐被淘汰。  
(陆德纹)





canshu xiezhen guodianya

**参数谐振过电压** (parametric resonance overvoltage) 振荡回路中某一储能元件的参数随时间作周期性变化而形成的谐振过电压。

**产生机理和谐振性质** 实际电力系统中的时变参数是指同步电机的同步电抗。凸极电机在作同步运行时，其电抗值在直轴同步电抗  $x_d$  和交轴同步电抗  $x_q$  之间变化，当凸极和隐极电机处在异步工作状态时，其电抗值在直轴暂态电抗  $x_d'$  和  $x_q$  之间变动，它们的变动频率均为工频的两倍。如果电机端部接有较大的容性负载（例如空载长线），则会发生特殊的参数谐振现象。凸极电机同步运行时产生的参数谐振称为同步自励磁，凸极和隐极电机异步运行时产生的参数谐振称为异步自励磁。

在具有时变参数的振荡回路中，通过电感参数的周期性变动而输入谐振能量，如果此能量大于串联回路中的电阻耗能，则谐振振荡将持续发展，过电压的幅值也不断增大而不受电阻的限制。实际上，由于电机铁芯的磁饱和和导线电晕损耗的抑制，参数谐振过电压一般不超过额定电压的 1.5~2.0 倍。

维持参数谐振的能量系由驱动电机转子旋转而使电抗作周期性变化的机械能直接转化而来。在实际情况下，只要电容器上留有不大的残余电荷，或者铁芯电感中有微小的剩磁或励磁电流，均可使得同步自励磁（即使励磁绕组开路）或异步自励磁（即使励磁电流为零）现象得以持续发展。同步自励磁过电压和过电流的发展速度较慢，现代的快速自动励磁调节装置一般可予以抑制。反之，异步自励磁的发展速度极快，调节装置起不到限压作用。

当电机容量不大时，它与数百公里空载线路相连就可激发起自励磁现象。中国在 10 kV（带有串联补偿）至 220 kV 电力系统中都曾发生过这种参数谐振事故。

**防止措施** 为了消除参数谐振，原则上可在串联回路中临时（例如在电力系统同步并列时）投入一个阻尼电阻，但此电阻的容量很大，且需增添开关设备。对

于计划性的合闸操作，尽量先在大容量的电源侧进行，或者增大发电机的投入容量，以便减小电抗参数，从而破坏参数谐振条件。在超高压长线路中，常在线路侧装设并联电抗器，它可补偿空载长线的电容，增大串联回路中的等效容抗，使之落在自励磁区域之外。

#### 参考书目

陈维贤，内部过电压基础，北京：水利电力出版社，1981

（陈维贤）

caozuo chongji jueyuan shuiping

**操作冲击绝缘水平** (switching impulse insulation level) 电气设备在标准波形的操作过电压作用下耐受电压的能力，用规定的操作冲击耐受电压表示。操作冲击耐受试验用的标准波为 250/2500  $\mu$ s。超高压电气设备必须用操作冲击波进行试验，确定操作冲击绝缘水平。220 kV 及以下的电气设备，在一定程度上可用交流工频电压试验代替操作波冲击试验。

**内绝缘的操作冲击绝缘水平** 内绝缘为油纸绝缘的电气设备，若带电部分完全被固体绝缘物覆盖时，操作冲击波与雷电冲击波的耐受电压之比为 1.0，或稍低于 1.0。处于变压器油中相向布置的裸电极间以及沿油表面的操作冲击波与雷电冲击波耐受电压之比为 0.6~0.8。当处于油中的裸露导体用固体绝缘物覆盖，或在导体间插入层压板作屏障时，上述比值可大于 0.83。

在中国，超高压电气设备内绝缘操作冲击绝缘水平 (SIL) 与避雷器操作冲击放电电压  $U_0$  相配合，其值为

$$SIL = 1.15 U_0$$

式中 1.15 为裕度系数； $U_0$  应考虑避雷器放电电压的分散性，取其上限值。

**外绝缘的操作冲击绝缘水平** 在以绝缘子和空气间隙为主的外绝缘结构中，间隙长度超过 2 m 后，操作冲击波放电电压随间隙距离的增加呈现饱和倾向。在各种不同的电场结构中，正极性操作冲击波的放电电压都比负极性低。棒-板间隙（导线对地、导线对构架等）在正极性操作冲击波作用下的 50% 放电电压与波前时间的关系曲线呈“U”形。某种波前操作波作用下的放电电压甚至比工频放电电压的幅值还低。

电气设备外绝缘操作冲击绝缘水平  $U_{out}$  为

$$U_{out} = \frac{SIL}{0.93}$$

式中 0.93 是海拔在 1000 m 及以下地区外绝缘在操作过电压作用下的空气密度和湿度综合修正系数。



对断路器、隔离开关同极断口间外绝缘要考虑反极性工作电压的叠加,即要在 $U_{\text{max}}$ 上再加 $0.9\sqrt{2}U_0$ , $U_0$ 为系统的最高运行相电压。

计算操作冲击绝缘水平的各种系数是结合中国的运行经验,经技术经济比较确定的。

超高压、特高压输配电设备的操作冲击绝缘水平,将明显影响设备造价、运行维护费用和供电可靠性。

中国国家标准 GB311.1《高压输变电设备的绝缘配合》中的第 3.6.3 条规定了 330~500 kV 设备的操作冲击耐受电压值。

(方 瑜)

caozuo guodianya

**操作过电压** (switching overvoltage) 电力系统中的故障和操作导致暂态振荡而产生的过渡过程过电压。暂态振荡的全过程围绕着操作后的稳态电压(工频过电压)进行,其振荡幅值的大小决定于具体的初始条件和电力系统的参数。将工频过电压写成 $K_g U_m$ , $U_m$ 为最高工作电压, $K_g$ 称为工频电压升高系数,则操作过电压为 $K_c K_g U_m = K_a U_m$ , $K_c$ 称为操作过电压系数, $K_a = K_c K_g$ 称为操作过电压倍数。

操作和故障形式的多样性决定了操作过电压的不同类别,主要有:中性点不接地系统中的弧光接地过电压,空载线路的合闸过电压,空载线路、空载母线和电容器的分闸过电压(见开断电容负载过电压),空载变压器、电抗器和电动机的分闸过电压(见开断电感负载过电压),不对称接地引起的长线解列过电压。

操作过电压的大小遵循统计规律。在作统计分析时,常取概率曲线中 2% 处的过电压(大于此过电压的概率为 2%)作为最大过电压,称为统计过电压。

系统中性点的接地方式对操作过电压的影响很大。在中性点非直接接地的系统中,中性点位移现象会导致产生很高的过电压( $K_a$ 最大可达 4 左右)。中性点直接接地的 110~220 kV 系统的  $K_a$  值则降至 3 左右。超高压长线路中的  $K_a$  值可能很高,除用并联补偿设备限制  $K_g$  值外,尚需采用专门措施限制  $K_c$  值,如采用金属氧化物避雷器和断路器的并联电阻等,以使  $K_a$  值降至 2.0~2.5 以下。

不同类别的操作过电压的持续时间差别很大。弧光接地过电压的持续时间较长,一般以秒计;空载线路分闸过电压的持续时间可达 1~2 个工频周期,即数十毫秒;空载变压器分闸过电压的持续时间则与雷电过电压相接近,约数十微秒;空载线路合闸和长线解列过电压的持续时间通常以毫秒计。它们是确定超高压电气设备的操作冲击耐受电压的主要依据。

(陈维贤)

changkaishi kaiguangui

**敞开式开关柜** (unclosed switchgear panel)

能明显地看到柜内各元件的开关柜,又称开启式开关柜。其外壳或隔板用网门结构,没有防护等级的要求,离地 2.5 m 高的带电元件还允许暴露在柜体外面。敞开式开关柜结构简单,制造方便,价格便宜,且能明显地看见进线隔离开关的分、合状态。但敞开式开关柜也存在着严重缺点,一是在门上没有联锁装置,以致容易使人误入带电间隔;二是网门结构在开关柜发生事故时,会危及柜外人员的人身安全。为此,又将网门改为铁门,并增设观察窗,称为半封闭式开关柜。有的还增加了防误操作闭锁装置。

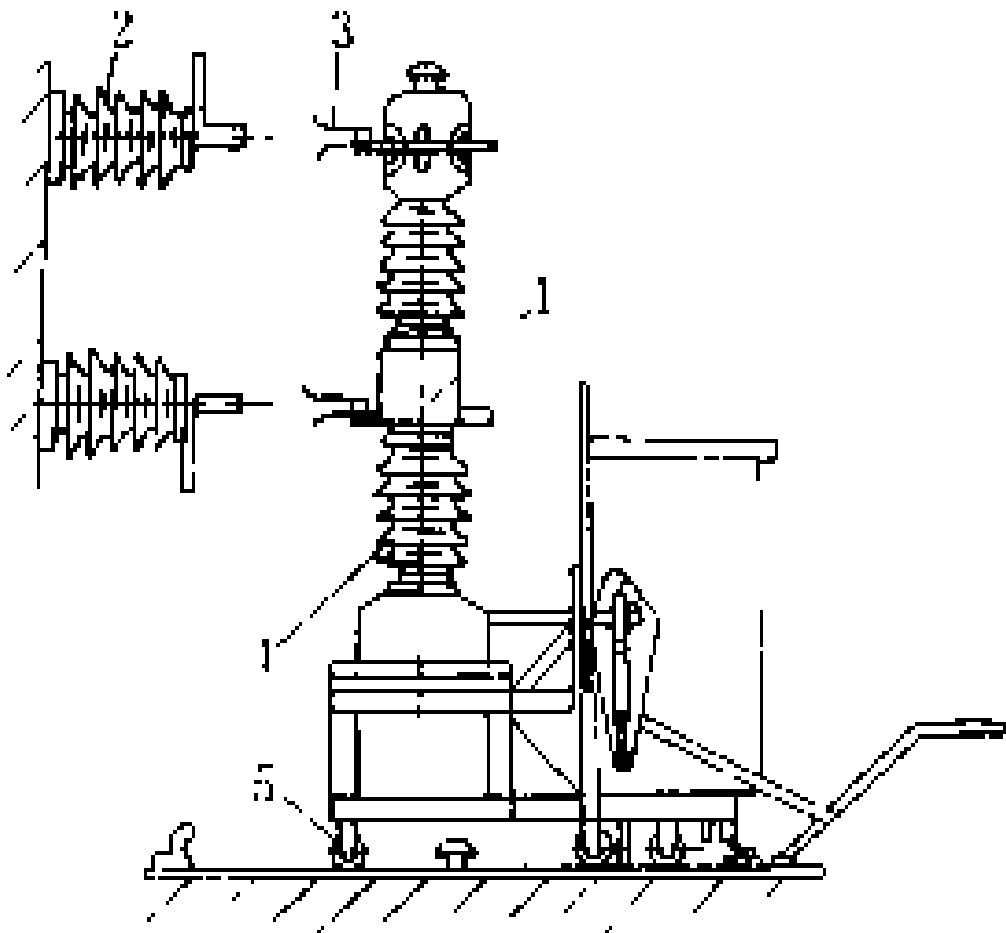
(顾觉鸿)

changkaishi zuhe dianqi

**敞开式组合电器** (unclosed type composite apparatus)

外绝缘暴露在大气中的组合电器。敞开式组合电器的各设备元件仍保持本身原有的技术性能和结构上的特点,但拆开以后部分设备不能独立运行。采用敞开式组合电器可减少变电所的占地面积,改善运行环境,并可建成屋内变电所。

常见的 220kV 及以上的敞开式组合电器有以隔离开关为主体的或以断路器为主体的两种。前者包括



35 kV 敞开式组合电器

(以少油断路器为主体)

1—电流互感器;2—隔离触头静支持座;隔离开关简化为 3—动触头;4—少油断路器;5—手车 一对插头,便于断路器与隔离开关之间实现机械上的联锁,防止误操作。如图所示为 35kV 敞开式组合电器的结构图。

近年来,出现了愈来愈多的敞开式组合电器产品。在这些产品中,有的将 10~35 kV 的若干电器组合后,用树脂浇铸成整体,形成系列产品。

(黄维枢)

chaodao dianlan

**超导电缆** (superconducting cable) 利用

在超低温下出现失阻现象(超导状态)的某些金属及其合金作为导体的电缆。能实现超导状态的金属及其合金有铌、钒、铌三锡、铌钛、铌锆、铌三锗、铌三镓以及近来发现的铌铝锗合金等。这种电缆由于导体处于超导状态,导体的电阻损耗趋于零,所以能极大地提高输送容量,适用于解决特大的电能输送和特殊技术领域。为了保持导体超导状态的稳定性,要求控制导体运行不超过三个临界条件,即临界温度、临界磁场强度和临界电流。作为电力电缆,为了获得大的载流能力和低的交流损耗,选用的导体要求具有高的临界温度和临界磁场强度。交流超导电缆的磁滞损耗和绝缘介质损耗随着输送容量的增大而迅速上升,因此它的输送能力比直流超导电缆要小得多。

超导电缆的结构要求有十分完善和严密的绝热层。致冷介质一般采用液氮和液氦。超导电缆的最早设计是在1967年提出的,但由于超导技术难度大,迄今仍处于实验阶段,尚无定型结构型式。有一种三芯软导体交流超导电缆的原型结构,其导体是由铜条镀上薄层的铌,以螺旋形式绕成一个管状,缆芯绝缘采用由液氮浸渍的绝缘带绕成,绝缘外面有一层用镀铌铜带绕制的涡流屏蔽,三个缆芯以三角形排列在一个用不变钢制成的管子内,液氮流过管子使导体冷却,然后经过另一小管回到致冷装置。不变钢管子用钢丝绳悬挂在一个由铝和不变钢合金制成的热辐射屏蔽管内,整个装置再用钢丝悬挂在保护钢管内。热辐射屏蔽管内部保持真空,它与保护钢管之间的间隙填充氧化铝粉末并抽真空作为绝热间隔。采用钢丝悬挂的办法可以避免冷缩引起的技术问题。超导电缆在投入运行前需预冷却约40天。

参考书目

King S Y, Halfter. Underground Power Cables.  
Hongkong: Hongkong University Press, 1977  
飯塚喜八郎. 電力ケーブル技術ハンドブック. 東京: 株式会社電気書院, 1974

(郑肇骥)

chaoliu fanzhuang

**潮流反转** (power reverse) 直流输电输送功率从正在运行的方向转变为向反方向倒送的过程。也指实现反向输送功率的操作过程。

机理 由于当今所采用的换流阀具有单向导电性,直流输电的潮流反转无法用电流反向来实现,只能用电压的极性反转来实现。因此,潮流反转前的正极反转后则为负极。当原受端的负极直流电压比原送端的负得更多时,直流电流流向不变,仍与换流阀可导通方向一致。两端直流输电系统在潮流反转时,不必改变输

电系统的主接线。

在潮流反转过程中,线路两端换流器的工况将发生变化。在反转前的原送端换流器运行于整流工况,相应于触发角 $\alpha < 90^\circ$ 状态;在反转后,改变为受端,换流器则运行于逆变工况,相应于 $\alpha > 90^\circ$ 。同理,在反转前的原受端换流器运行于 $\alpha > 90^\circ$ 的逆变工况,在反转后则变为送端,换流器运行于 $\alpha < 90^\circ$ 的整流工况。因此,在潮流反转时,两端换流站与线路间的接线方式无需改变,只需调节两端换流器的触发角,以达到给定的电压和电流值,直流电压极性也就同时随之而反转。

潮流反转的两种方式 潮流反转有正常运行时的正常潮流反转和故障时的紧急潮流反转两种。

(1) 正常潮流反转。一般由运行人员在控制台操作,并由控制系统自动进行。控制系统接到潮流反转信号后,首先按一定速度降低直流电流到允许的最小值,然后再进行电压极性反转,并将反转后的电压增大到其额定值,同时也将电流升至其设定值,至此反转过程结束。反转过程所需的时间由两端交流系统对功率变化的承受能力来确定,一般为几秒钟到几分钟。

(2) 紧急潮流反转。一般由控制系统进行判断后,发出紧急潮流反转信号,使直流电压极性反转,直流电流可以保持不变。由于线路电容的存在,电压极性反转需要一定的时间,一般在几百毫秒内可完成。对于直流电缆线路,为防止电压瞬时变化太快而损害电缆绝缘,一般反转速度应放慢一些。

潮流反转也可以利用两端换流站直流电流整定值的改变来实现。一般来说逆变站的电流整定值要比整流站的整定值小一个裕额(如额定值的10%),当要潮流反转时,将逆变站的电流整定值改为反转后预计的直流电流值,而整流站的电流整定值比逆变站的小一个裕额(如10%的额定值)。此时,整流器控制系统检测到实际电流大于其整定值,从而通过调节器加大触发角 $\alpha$ ,到 $\alpha > 90^\circ$ 则变为逆变器,并继续加大 $\alpha$ 角以增大反极性的直流电压到其整定值。同时,逆变器的电流小于其整定值,从而通过调节器减小 $\alpha$ 角,到 $\alpha < 90^\circ$ 变为整流器,并继续减小 $\alpha$ 角以保持整定的直流电流值,直到等于其整定值。当两端控制系统使直流输电的直流电压和电流保持稳态运行在新的整定值时,反转过程至此结束。

(赵晓君)

chengshi peidianwang

**城市配电网** (city distribution system)

向一个城市及其郊区分配和供应电能的电力网。它包括高压配电网、中压配电网和低压配电网。城市配电网连同为其提供电源的输电线路及变电所,统称为城市



电力网,简称城网。城网是电力系统的重要组成部分,其用电负荷密度比较大,供电质量和可靠性要求高。城市供电企业的营运范围,常常包括城市配电网,以及向它提供电源的输电网。城市的输电网与配电网也常常总称为供电系统或供电网。

一般电力系统通常包括几个城市电力网。每个城市电力网既是电力系统的一个重要组成部分,同时又是电力系统所服务的城市建设中的一项重要基础设施。为此,城市电力网建设要与城市建设紧密配合,同步实施,还要与环境协调,与景观和谐。

城市配电网大部分分布在城市的核心地带,其电源主要来自向城市供电的220~500 kV输电网或主干线(一般多在城市外围),也有来自城市或其近郊的发电厂。城网的规划设计,在中国应符合原能源部与建设部联合颁发的《城市电力网规划设计导则》,以确保城网与城市建设的协调一致。

城市配电网的基本特点是:随着负荷的增长、电源的扩充以及供电质量要求的提高,配电网必须不断发展、不断改造,既不能长期不变,又不能一次建成最终规模。为此,通常是吸取本国及各国的经验,建立若干技术发展原则,作为逐步发展、依次过渡的方针与目标。城市配电网建设的重要技术原则,包括城市外围双环网规划、简化变压层次以及城市供电设施建设等方面。(见配电网)

**城市外围双环网规划** 建在城市外围的环网,是供应大城市配电网的主要电源,对其可靠性的要求很高。各国的经验,都是以建成双环网为规划目标。一般都是在做好双环网规划的基础上,在城市外围预留双环网的线路走廊及其枢纽变电所的位置,并纳入城市建设规划。在发展初期,一般是先按双回路设计,先建其中一回输电主干线及其变电所,以后要便于逐步发展成双环网。

城市外围的双环网,一般都采用220 kV输电电压。大城市的负荷增长很快,当需要新电源接入而使环网的短路容量超过规定值时,有必要建设更高一级电压的500 kV双环网,以避免更换断路器、母线及其架构;特别是远距离大容量的新电源常以500 kV输入城市外围,从而促进了逐步发展形成500 kV双环网。在高一级电压环网形成后,应将原有的环网开环分片运行,以取得降低短路容量的效益,并避免高压与低压形成电磁环网的运行困难。有些小城市,以及在城市电力网发展初期,常常是先形成110 kV单(或双)环网,待220 kV环网建成后,亦由于类似原因,将110 kV环网开环分片运行。

城市外围的环网,是城市配电网的重要网架。这个网架上的枢纽变电所,一方面向城市中心地区直接以

放射结构供电,或者降压配电,另一方面向城市近郊区及远郊区县供电。城市郊区供电技术与农村供电技术,有许多共同之处。(见农村配电网)

**简化变压层次** 城市配电网的电压等级,由于历史发展过程所遗留的问题等原因,曾经存在多种电压标准与多层次变压两个问题,这是配电网技术改造的重点。一些私营电力公司较多的国家,实际存在的电力系统,额定电压一般都比较复杂。中国经过几次升压改造工程以及标准电压的修订,国家的额定电压标准已经大为简化,基本上建立了750、500、330、220、110、35(63)、10、0.38/0.22 kV体系。

中国电力系统的电压等级有三个系列:①大多数电力系统是500/220/110/35/10/0.38 kV系列;②东北电力系统主要是500/220/63/10/0.38 kV系列;③西北电力系统是330/110/35/10/0.38 kV与330/220/110/35/10/0.38 kV系列并存。有些城市的某些地区,在简化电压等级的基础上,根据当地具体条件,进一步简化变压层次,例如采用220/110/10 kV或220/35/10 kV等越级降压措施,其目标是以220 kV输电电压为基础,高、中、低配电电压只各采用一级,以节约建设投资与运行费用。

**城市供电设施建设** 要满足城市电力网的规划设计要求以及城市建设的特点,并与市容环境相协调。城市供电设施的发展方向,应是占地少、小型化、耐燃或不燃、自动化、标准化,并有利于发展。城市供电设施主要包括城市变电所、城区架空线路、电缆线路等。

**城市变电所** 变电所的所址要按照最终规模预选位置和面积,并初步划定线路走廊与电缆通道,在城市建设规划中确定。变电所设计要采用节省用地的屋外型或半屋外型布置方式。市中心区的变电所要采用屋内型布置方式,并考虑与其他建筑物合建。大城市中心区用地更为困难,可考虑建设地下变电所,也可将变电所建设在其他建筑物的底层。

同一城网的变电所,其主变压器的容量和规格要尽可能采用少数几种,力求避免多种多样。

**城区架空线路** 城网的架空输电线路及高压配电线路主干线,其导线截面的选择除按电气、机械条件计算外,在同一城网内应力求一致,每种电压等级的导线截面一般只选用两种规格,并应留有发展余地。市区内的架空线路杆塔要适当提高安全系数,适当增加高度、缩小档距,以提高导线对地距离。

城网的中、低压配电线路及其配电变电所、开关站,一般都是配合城市建设和改造以及开发新区的规划同时进行,并作为市政建设的配套工程。在城市建设规划中,要确定市区道路的某一侧为电力线路的专用走廊,同侧人行道下为电力电缆走廊。市区内架空配电

线路,特别是街道上的线路,一般都是与园林主管部门充分协商,适当提高导线对地高度,合理选择街道树种以及及时修剪树枝,以保持导线对树枝的安全距离。

市区中、低压配电线路的导线,一般都是选用裸导线、绝缘导线或绝缘电缆。主干线导线一般不超过两种规格,并按远期规划考虑,以免频繁更换导线。

在主要街道、路间绿地及住宅小区或建筑群中,最好采用箱式变电站,配合以电缆进出线或架空配电线。

电缆线路 城市的繁华地区、重要地段、主要道路、高层建筑以及市容环境美化、重点风景旅游区段等地区,适宜采用电力电缆线路。

市区电缆线路的路径,一般都是与城市其他地下管线统一安排,并考虑远期发展要求。沿街道的电缆隧道人孔及通风口,都要与环境相协调。最好的发展方式是与市政建设、多种管线协调建设综合管道或隧道。

城市电缆线路的导线截面选择,除按输送容量、热稳定条件、敷设方式等一般条件考虑而外,一个城网的主干线应力求统一,每个电压等级的电缆导线截面可选用两种规格,预留发展容量,一次埋入。

参见彩图插页第 25 页 76 图。

(徐博文)

chongji dianliu fashengqi

冲击电流发生器 (impulse current generator)

用于产生冲击电流的试验装置。主要用来检验避雷器的残压和冲击电流耐受能力,也可用来检验其他电气设备和材料在冲击电流作用下的电气性能,测定接地装置的冲击接地阻抗等。冲击电流发生器主要有雷电波冲击电流发生器和矩形波冲击电流发生器两种。

冲击电流波形 国际电工委员会 (IEC) 标准推荐两种类型的冲击电流波形。一种波形具有迅速上升的波前,达峰值后以近似指数波形或强阻尼的正弦波形衰减到零,整个过程十至数十微秒,见图 1 (a)。称图中  $T_1$  为波前时间,  $T_2$  为半峰值时间,该波形记做  $T_1/T_2$ 。这种冲击电流波形用以模拟雷电流。另一种波形

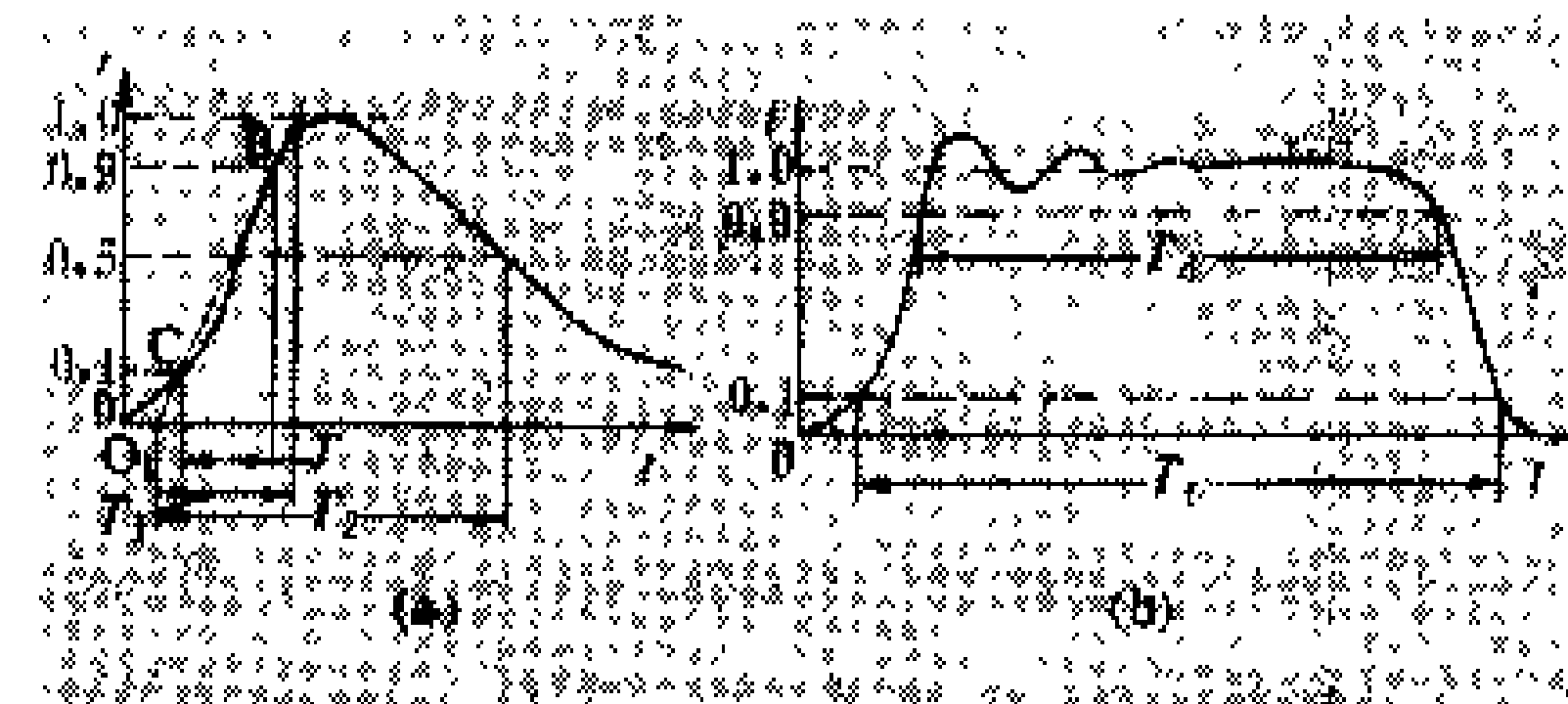


图 1 冲击电流波形的表示方法

(a) 雷电波冲击电流; (b) 矩形波冲击电流

近似矩形,整个过程数百至数千微秒,见图 1 (b)。称图中  $T_1$  为峰值持续时间,  $T_2$  为总持续时间。这种冲击电流波形用以模拟操作波电流。IEC 推荐的标准冲击电流波形对于第一种类型波有 1/20、4/10、8/20 和 30/80  $\mu s$  四种,对于第二种类型波的峰值时间有 500、1000、2000  $\mu s$  或 2000~3200  $\mu s$  四种,且  $T_2/T_1 \leq 1.5$ 。如波前或波峰出现振荡,则按通过振荡所画的平均线选取有关数值。

雷电波冲击电流发生器 产生模拟雷电流波形的冲击电流发生器。图 2 为其原理电路图。其工作过程是:先由变压器 T 经硅堆 V 向电容器组 C 充电,当充电电压达预定值时,火花间隙 g 被触发,电容 C 经回路总电感 L 和总电阻 R 放电。当 R 大于或等于临界阻尼值  $2\sqrt{L/C}$  时,在回路中产生单向的冲击电流波。当 R 小于临界阻尼值时,则产生振荡冲击电流波。冲击电流幅值  $I_m$  的大小与回路参数有关,在相同的 C 值与充电电压时, L 越小,  $I_m$  就越大。为了获得尽可能大的电流,通常要选用电感值小的脉冲电容器,并在布置主电容器时使连接线的总长度尽可能短,使回路总电感值尽可能减小。

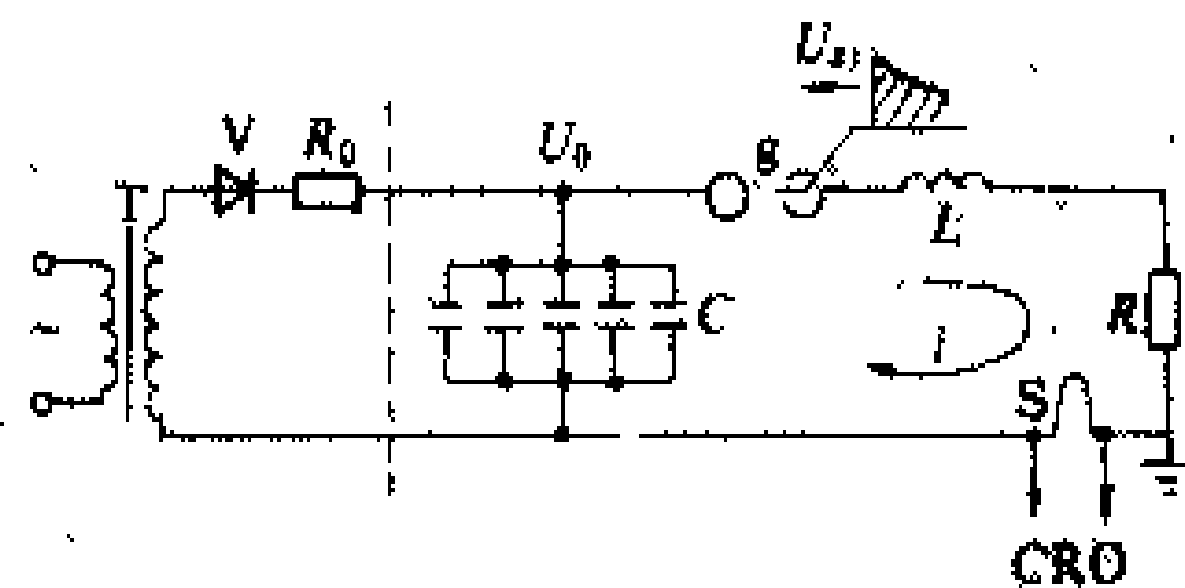


图 2 雷电波冲击电流发生器原理图

矩形波冲击电流发生器 产生模拟操作波电流的冲击电流发生器。图 3 为其原理电路图。它是一个由若干个 T 形元件组成的输电线路模型,当电容器的台数为 n 时,可形成 (n-1) 个 T 形元件。T 形的两个臂各为 L/2 的电感,中间接出电容 C。为使矩形波冲击电流发生器接近输电线路的实际特性,通常 n 不能小于 7。流过负载电阻 R 的电流的理论计算值为  $I=U/(Z+R)$ , 电流的持续时间  $T_c \approx 2(n-1)\sqrt{LC}$ , 式中 U 为电容器的充电电压,  $Z=\sqrt{L/C}$ 。当  $Z=R$  时,输出电流 I 最大。

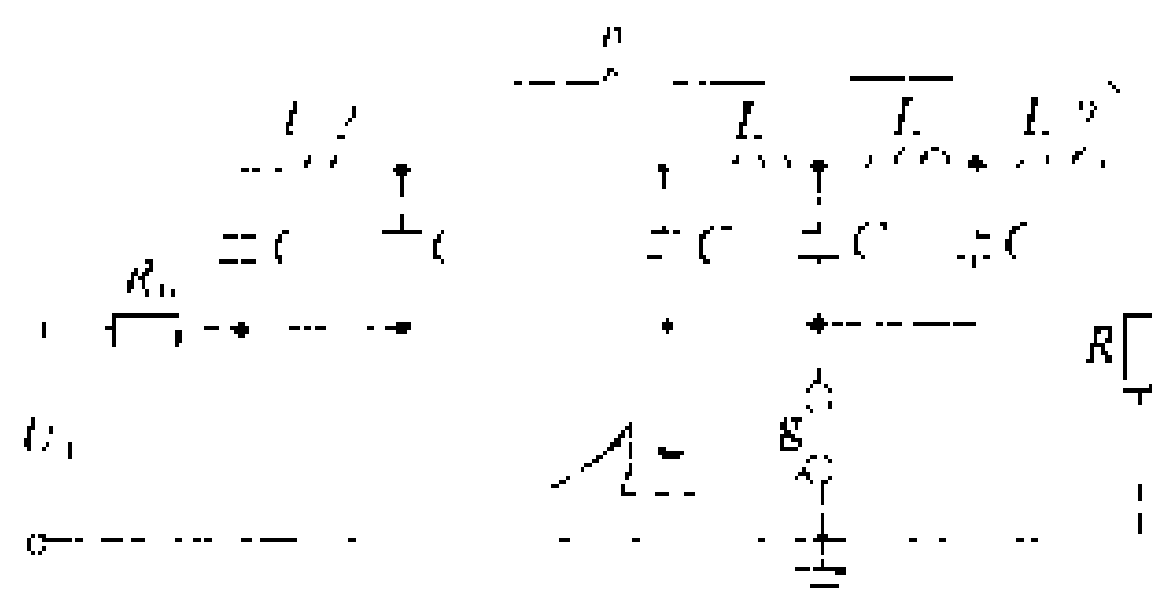


图 3 矩形波冲击电流发生器原理图

冲击电流的测量 通常用分流器或罗戈夫斯基线圈与示波器组成的测量系统测量冲击电流。分流器是一无电感的低阻值电阻器,它与被测电流支路串联,如图2中的S,其上的电压降正比于通过的电流。罗戈夫斯基线圈是一种特殊设计的环形电感线圈,测量时,将被测电流支路穿入环形中心,构成一个不带铁芯的以被测电流支路为原边的空芯的电流互感器。

参考书目

张仁豫等, 高电压试验技术, 北京: 清华大学出版社, 1982

(类 力)

chongji dianya tashenqi

**冲击电压发生器** (impulse voltage generator) 用于产生高电压冲击波的试验装置。主要用来研究电气设备及绝缘材料的冲击绝缘强度, 工业及民用建筑的防雷保护, 电子设备的电磁兼容性以及气体放电的物理过程等。

**标准波形** 电气设备及绝缘材料的冲击绝缘强度与冲击电压的波形有着密切关系。为使冲击电压试验的结果具有代表性和可比性, 冲击电压的波形必须标准化。冲击电压发生器通常能够产生代表雷电过电压的雷电冲击和代表操作过电压的操作冲击两种波形, 并以波前时间 ( $T_1$ )、半峰时间 ( $T_2$ ) 来表示冲击波形的特性, 记作  $T_1/T_2$ 。雷电冲击的波前时间以视在波前时间  $T_1$  (见图1) 来表示, 半峰时间为  $T_2$ 。操作冲击

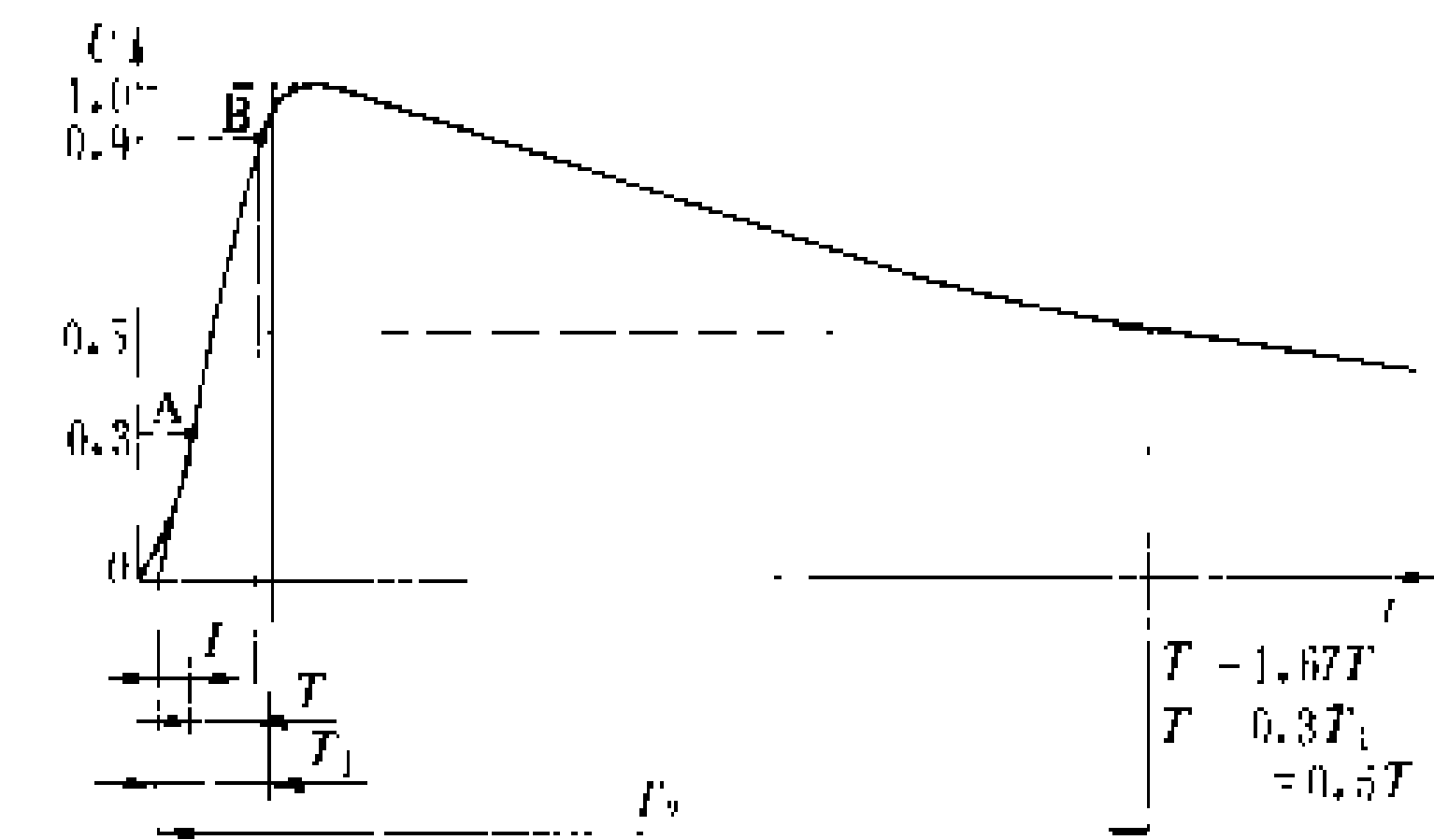


图1 雷电冲击波形

的波前时间以波峰时间  $T_p$  来表示, 半峰时间为  $T_2$ , 90%峰值以上的持续时间为  $T_d$  (见图2)。国际电工委员会 (IEC) 及中国国家标准都规定: 标准雷电冲击波形为  $1.2/50 \mu s$ , 标准操作冲击波形为  $250/2500 \mu s$ 。此外, 为了满足不同的研究要求, 也可以用冲击电压发生器产生其它非标准的冲击波形。

**基本要求** 对冲击电压发生器的基本要求是: ①输出电压的波形、幅值满足有关标准的要求; ②输出电压的波形和幅值的稳定性、重复性好; ③同步范围宽

广; ④可产生多种波形以满足不同试验的要求。

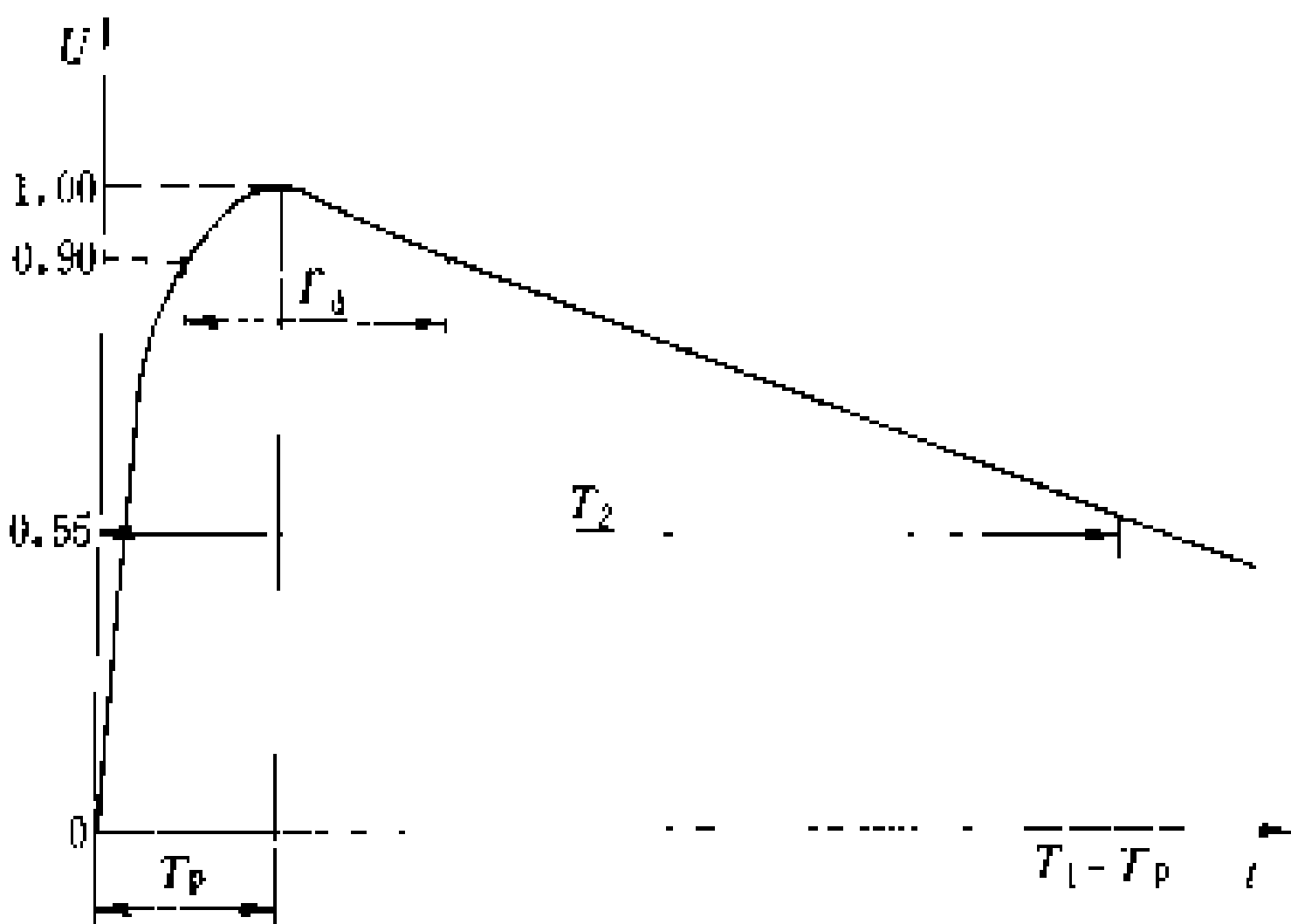


图2 操作冲击波形

**工作原理** 工程上通常采用 Marx 回路的冲击电压发生器, 其电气回路接线见图3(a)。基本原理: 变压器T的高压侧电压经整流后向并联的电容器组  $C_1 \sim C_4$  充电, 当电容器上的电压达到预定值时, 第一级火花球隙  $g_1$  被触发。由于球隙间过电压和火花照射的作用, 各级间隙在极短的时间内相继被击穿, 从而把各级电容器串接起来对电阻、电容等元件放电, 在其输出端得到一个有一定波形的冲击电压。冲击电压发生器的放电过程可通过其等值电路 [见图3(b)] 来描

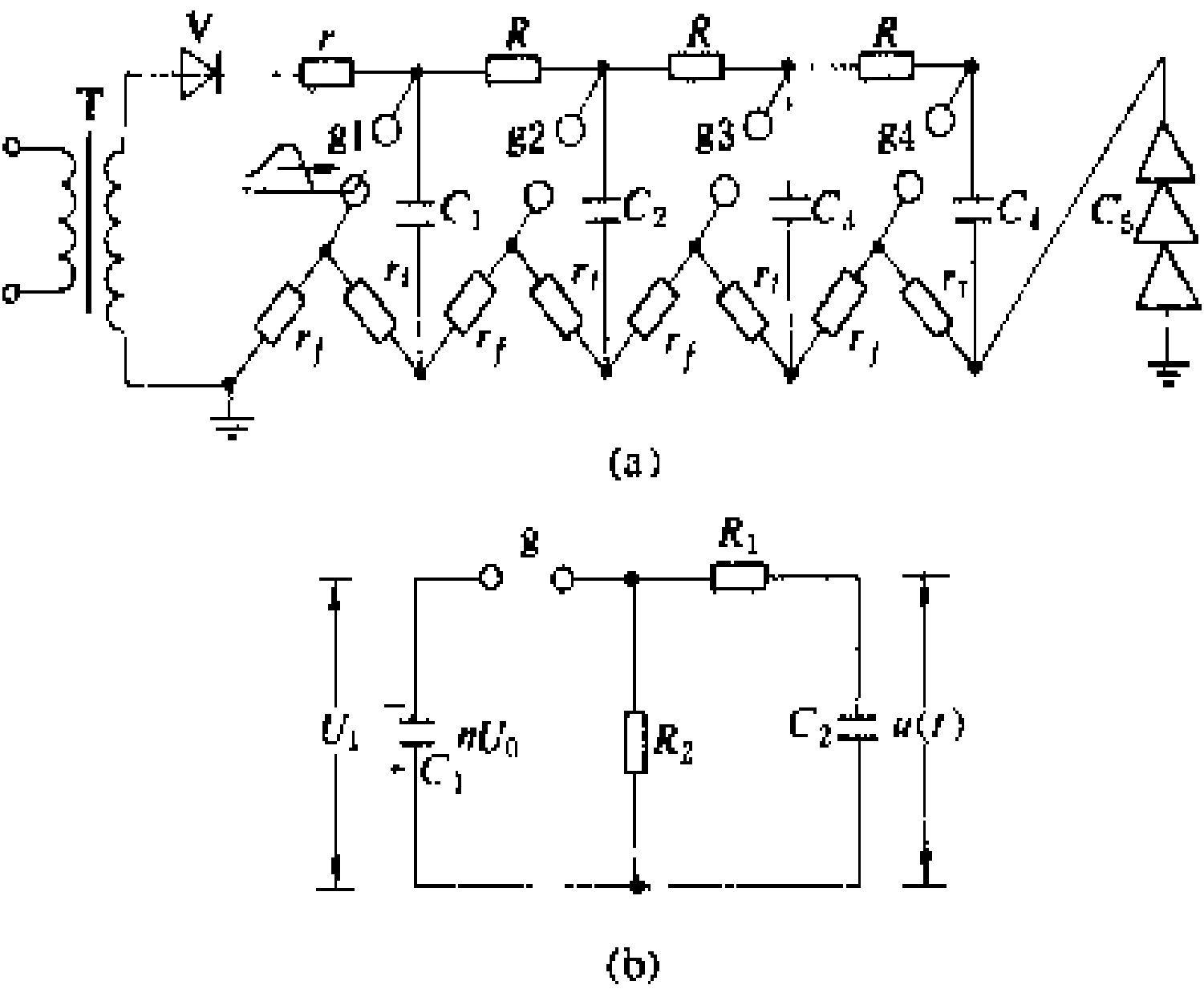


图3 冲击电压发生器的电气回路

(a) 基本回路; (b) 放电时的等值回路

述: 球隙  $g$  击穿时  $C_1$  经电阻  $R_1$  对  $C_2$  充电, 形成输出电压的波前部分; 当  $C_1$ 、 $C_2$  上的电压达到平衡后, 就一起对电阻  $R_2$  放电, 形成输出电压的波尾部分。回路输出电压  $u(t)$  的波形是两个指数波的叠加, 即

$$u(t) = \epsilon n U_0 (e^{-\frac{t}{\tau_f}} - e^{-\frac{t}{\tau_r}})$$

式中  $U_0$  为每台电容器的充电电压;  $n$  为电容器的台数;  $\epsilon$  为回路效率;  $\tau_f$  为波前时间常数,  $\mu s$ ;  $\tau_r$  为波尾时间常数,  $\mu s$ 。

**主要技术指标** 以标称电压和标称储能来表示。



标称电压  $U = nU_0$ , kV, 其中  $n$  为电容器台数;  $U_0$  为每级电容器的额定充电电压。标称储能  $W = \frac{1}{2} CU^2 \times 10^{-3}$ , kJ; 其中  $C$  为  $n$  台电容器串联后的等值电容, F。

**结构** 冲击电压发生器用得较多的有柱式和塔式两种结构。柱式结构是:做成柱形的电容器也作为一个绝缘元件,与绝缘筒相间重叠组成柱形。它又分为单柱式和多柱式。其特点是结构紧凑,占地面积小,单位体积储能大,适合于电压不高的发生器。塔式结构有框架式和桁架式两种,每一种又可以有自立式和悬吊式之分。自立式主要用于无地震或地震烈度不高的地区,悬吊式主要用于地震区。塔式结构中的电容器被安放在每级的平台上,便于使用大容量的电容器。塔式结构牢靠,适用于电压等级高、容量大的发生器。参见彩图插页第 42 页 125 图。

为满足超高压和特高压输电研究的需要,近 20 年来世界上许多国家都建成高参数的冲击电压发生器,例如法国电力公司高压实验室的冲击电压发生器是 6 MV,苏联列宁格勒国立工业大学高电压实验室的是 7.2 MV,日本电力中央研究所实验场的是 10 MV 和 12 MV(两台均为悬吊式结构)等。中国电力科学研究院在 20 世纪 70 年代末也建成了一台 6 MV 的冲击电压发生器。

#### 参考书目

张仁豫等. 高电压试验技术. 北京:清华大学出版社, 1982

(王 来)

chongji dianya shiyan

### 冲击电压试验 (tests with impulse voltage)

检验电力设备和绝缘材料耐受雷电过电压和操作过电压能力的试验。按试验电压的波形可分为:模拟雷电过电压作用的雷电冲击全波、截波和陡波前三种冲击试验和模拟操作过电压作用的操作冲击试验。按试验方法可分为:50%破坏性放电电压试验和额定冲击耐受电压试验。此外,还有伏-秒特性试验等。

国际电工委员会(IEC)和中国国家标准都规定:标准雷电冲击的波前时间为  $1.2 \mu s$ , 半峰时间为  $50 \mu s$ , 波形记作 1.2/50;标准雷电冲击截波是指标准雷电冲击全波从视在起点起经  $2 \sim 5 \mu s$  被截波装置截断,电压陡降为零的波形。标准操作冲击的波前时间为  $250 \mu s$ , 半峰时间为  $2500 \mu s$ , 波形记作 250/2500。非标准操作冲击波有 100/2500、500/2500 两种双指数波,以及第一半波持续时间为  $2000 \sim 4000 \mu s$ 、反极性的第二个半波峰值为第一个半波峰值的 80% 的衰减振荡波。(见冲击电压发生器)

输配电设备一般都要进行雷电冲击全波试验,对变压器类带有绕组的设备还要进行雷电冲击截波试验,对额定电压在 330 kV 及以上的设备,还要进行操作冲击波试验。用雷电冲击只需做干试验,而用操作冲击则干、湿两种试验都需要做。

雷电冲击试验是以冲击电压发生器作为电源装置;操作冲击试验可以用冲击电压发生器来产生双指数波形的操作波,也可以用试验变压器来产生衰减振荡的操作冲击波。

**50%破坏性放电电压试验** 确定放电概率为 50% 的预期电压值 ( $U_{50\%}$ ) 的试验。 $U_{50\%}$  是绝缘配合中表征绝缘水平的一个重要数据。这种试验只适用于自恢复绝缘(见电气设备绝缘水平)。确定  $U_{50\%}$  的方法主要有多级法、两点法和升降法三种。

**多级法** 将试验电压按一定间隔分成 4~6 级,每级电压下至少施加 10 次冲击,并记录放电率(即放电次数与加电压次数的比值)。根据各级电压及其所对应的放电率,可在正态坐标纸上拟合出一条直线,对应于 50% 放电率的电压就是  $U_{50\%}$  的估计值。对应于放电率为 16% 的电压  $U_{16\%}$  与  $U_{50\%}$  之差即为绝缘放电的标准偏差 ( $\sigma$ ) 的估计值。为提高  $U_{50\%}$  和  $\sigma$  的准确度,可增加每级电压下的试验次数。多级法适合于气象条件相对稳定的户内试验。

**两点法** 将试验电压分成两级,使高、低两级电压下的破坏性放电概率分别为 80%~95% 和 5%~20%。在获得足够多的观测数据后,就可根据两个电压及其对应的放电率在正态坐标纸上作一直线,并可按多级法的方法确定  $U_{50\%}$  和  $\sigma$  的估计值。两点法适用于户内和户外的试验。

**升降法** 以电压  $U_{50\%}$  为中心,并以变动的电压施加在绝缘上,每次施加的电压要根据前一次的试验结果来确定。试验时先选一接近  $U_{50\%}$  的电压  $U_0$  作为试验电压的初值,如果在该电压下绝缘发生了击穿,则下一次试验电压为  $U_0 - d$ , 否则为  $U_0 + d$ 。 $d$  是电压增量, $d$  应选在  $(0.5 \sim 1.0) \sigma^* U_0$  之间 ( $\sigma^*$  是根据经验估计的绝缘放电的相对标准偏差,即  $\sigma^* = \sigma / U_0$ )。如此进行下去,直到记录到足够多的观测数据,就可根据一定的公式计算出  $U_{50\%}$  和  $\sigma$  的最佳估计值。进行标准雷电冲击试验时,应施加不少于 20 次的冲击电压。而对于标准操作冲击试验,应施加不少于 40 次的冲击电压。在同一准确度的条件下,升降法的次数比多级法的要少,因此它适合于气象条件不十分稳定的户外试验,当然也适合于户内试验。

**额定冲击耐受电压试验** 以规定的电压波形和幅值对被试品施加规定的冲击次数,以检验被试品是否能承受该电压的作用,它是考核电力设备在雷电过电



压或操作过电压作用下绝缘性能的试验。试验方法有15次冲击耐压试验和惯用法冲击耐压试验。

**15次冲击耐压试验** 用于自恢复和非自恢复组合绝缘的耐受电压试验。试验时对绝缘施加15次具有规定波形和极性的额定冲击耐受电压,若在非自恢复绝缘上未发生破坏性放电,而在自恢复绝缘上出现的破坏性放电不超过2次,则认为通过了该项试验。

**惯用法冲击耐压试验** 绝缘配合惯用法所要求的一种试验。试验中对被试品施加正、负极性的冲击耐受电压各3次(在已知某种极性的冲击电压对被试品的考核更为严格时,也可以只施加该极性的冲击电压3次),若被试品未发生破坏性放电,则认为被试品通过了该项试验。这种施加冲击次数较少的耐受试验适合于非自恢复绝缘的设备。

**伏-秒特性试验** 确定被试品的破坏性放电电压和放电时间关系的试验。保护电器与被保护设备的伏-秒特性是绝缘配合的重要依据。

**雷电冲击伏-秒特性** 以波形固定不变而幅值不同的雷电冲击施加在被试品上,破坏性的放电可以发生在波前、波峰或波尾处,由此可得到以被试品破坏性放电电压幅值为纵坐标、以放电时间为横坐标的关系曲线。

**斜角波伏-秒特性** 以陡度不同的斜角波电压施加在被试品上,所得到的被试品破坏性放电电压与放电时间的关系曲线。

**全伏-秒特性** 用不同波前时间的冲击电压施加在被试品上,所得到的50%破坏性放电电压与波前时间的关系曲线。一般外绝缘的全伏-秒特性曲线呈“U”形。

**陡波前冲击试验** 用于检验绝缘子等固体介质耐受陡度很高的雷电过电压能力的试验。试验时,以上升时间很快的斜角波电压的正、负两种极性和规定的冲击次数施加在被试品上,如果破坏性的放电仅仅是被试品表面的闪络,而未带来表面的和内部的任何损伤,则认为被试品通过了该项试验。

参见彩图插页第42页124图。  
(王 来)

chongji jiedi zukang  
**冲击接地阻抗** (impulse earth impedance)

冲击电流流入接地体时,接地体上的冲击电压和冲击电流的比值。冲击接地阻抗是随时间变化的。工程应用中为方便起见,也把冲击接地阻抗作为接地体上冲击电压的最大值和冲击电流最大值之比,称冲击接地电阻。由于电压最大值和电流最大值出现的时刻可

能不同,所以冲击接地电阻并无实际的物理意义。  
(解广润)

chongji tongbu fadianji shiyanzhan  
**冲击同步发电机试验站** (short-circuit generator in high power testing station)

以大型拖动电动机带动特制巨型冲击同步发电机为试验电源的大功率试验设施。它便于进行快速自动重合闸试验,三相试验,动、热稳定的联合试验等,且试验条件真实,试验容量和工作效率不受电力系统正常工作的限制。冲击同步发电机试验站是大功率实验站的主要类型,是高压开关设备进行型式试验的主要设施,站内主要设备有冲击同步发电机、拖动电动机、尾接电抗器等。

**冲击同步发电机** 专门设计的短路容量大、阻抗小、机械强度高、能反复承受短路方式的巨型同步发电机,其单台容量达100~300 MW。为了降低冲击同步发电机的阻抗,其磁通密度设计得较低,且气隙小,结构的精度和强度要求高,因而材料消耗大。例如,日本东芝公司的7400型两极机的标称短路容量为7400 MV·A,总重464 t,德国的西门子公司公司的4350型八极机标称三相短路容量为4350 MV·A,总重达630 t,比同容量普通机组的重量高出约2倍。冲击同步发电机多为两极强阻尼型或多极弱阻尼型,运行时,借助于电动机拖动,待达到额定转速后,将其定子出线端突然短路以获得数百千安的大电流。它可以单台独立运行,也可以多台并联运行以获得更大的短路容量。两极机组的本体及基础承受的力矩均较小,但端部绕组受力较大。

**拖动电动机** 一般为数兆瓦的感应电动机,将冲击同步发电机带到额定转速后,拖动电动机即行脱离电源,整个机组靠自身惯性运行,使电力系统免受冲击负荷的影响。

**尾接电抗器** 安装在冲击同步发电机各相定子绕组尾部的线性电抗器,借以限制发电机的内部短路电流。

**发展状况** 1912年德国AEG公司建成世界第一个冲击同步发电机试验站。70年代,冲击同步发电机试验站发展迅速,以建于荷兰电工器材试验有限公司的荷兰KEMA大功率实验站的规模最大,它是世界性的权威机构。能生产冲击同步发电机的公司及制造厂有ABB集团公司、意大利的TIBB公司、日本的东芝公司和日立公司、德国的西门子公司和AEG公司、苏联的电力工厂以及中国的哈尔滨电机厂。

(顾宪鸿)



chongdian zhuangzhi

**充电装置 (charging device)** 将交流电源转换为直流电源供蓄电池充电用的变流设备。变电所中的充电装置多半采用电动发电机组、硅整流器和晶闸管整流器,也有的采用硒整流器。中国在 20 世纪 50 年代和 60 年代初,变电所中一般采用电动发电机组,个别变电所采用过硒整流器作为蓄电池组的充电装置。60 年代中期开始逐渐采用硅整流设备。与电动发电机组相比,硅整流器具有工作可靠、维护方便、效率高、运行无噪声等优点,因而已广泛用于蓄电池组的充电及浮充电设备,而不再使用电动发电机组。此外,由于硅整流设备在低负荷(5%额定功率)时运行也很稳定,因而在变电所中一般都采用一套硅整流设备兼作充电和浮充电用,对大型变电所则仍是充电和浮充电各设一套充电装置。

**电动发电机组** 由交流电动机和直流发电机组成。最常用的电动机是感应电动机。直流发电机多半采用复励式,使在负荷波动时直流电压较为稳定。

**硅整流器** 整机包括主电路和控制电路两大部分。其调压系统属于反馈、比较和放大的闭环系统,由直流输出端取样,经比较放大,控制移相脉冲,触发单相桥式半控整流电路,送出电压大小可以变化的直流来控制主电路饱和电抗器的直流绕组,从而改变饱和电抗器交流绕组的压降,使整流器输出的直流电压得到调整,达到自动稳定的目的。图 1 为带调压系统的饱和电抗器式硅整流器的原理方框图。

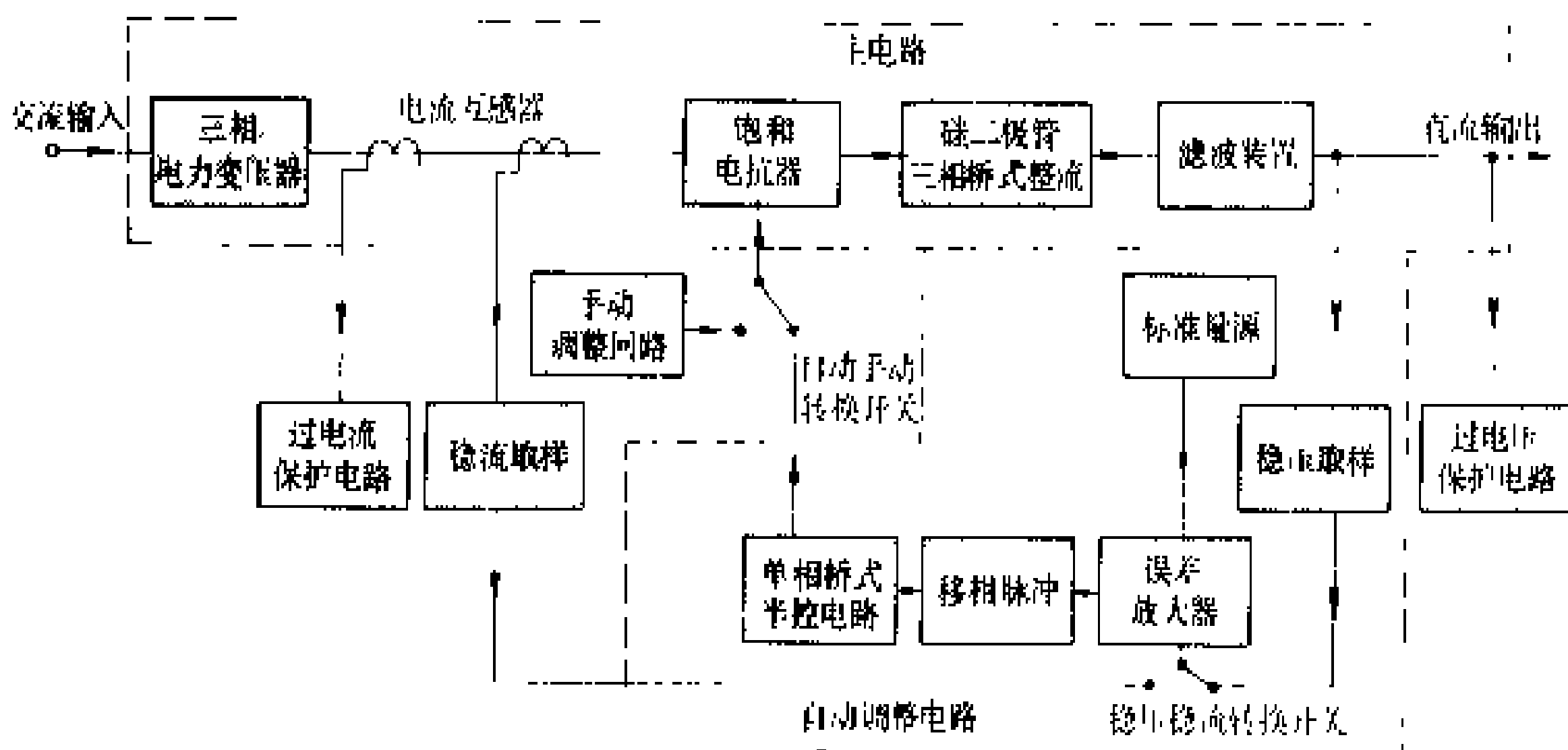


图 1 硅整流器原理方框图

**主电路** 三相交流输入电源经交流接触器、主熔断器、主变压器一次绕组,再由主变压器二次绕组经由电流互感器、饱和电抗器的交流绕组接到三相硅整流桥,整流后经过电感和电容组成的滤波器,将三相交流电源变成脉动电压符合要求的直流电源。

饱和电抗器每相由两个口字形铁芯组成,分别绕有相同的两个交流绕组、控制绕组和位移绕组。交流绕组与整流元件串联,通过的是整流后的脉动电流,其直

流成份产生的磁场将影响铁芯的饱和程度。控制绕组通过直流产生直流控制磁场,其方向与交流绕组磁场方向相同,改变控制磁场的大小,可改变交流绕组的压降,从而改变整流器的输出。位移绕组由固定直流电源供电,其磁场方向与交流绕组的相反,用以调整饱和电抗器的静态工作点,也可部分补偿电源电压变化的影响。饱和电抗器实际上是一个具有内反馈的磁放大器,利用直流磁场的变化,控制交流绕组的压降变化,用较小的直流功率控制较大的交流功率。

**控制电路** 即自动调整回路,由取样环节、标准量源、误差放大回路、移相脉冲发生器等组成。当电源电压升高或负荷电流减小时,引起整流器输出电压增高,从而取样电压也升高,通过比较放大后的控制电路的输出减少,使通过饱和电抗器直流控制绕组电流减少,交流绕组压降增大,整流器输出电压下降,从而起到稳压的作用。

**晶闸管整流器** 整机包括主电路和控制电路两部分。与硅整流器的主要不同之处是其整流电路,它是由晶闸管组成的三相桥式整流电路。晶闸管的控制极由移相脉冲发生器中的脉冲变压器输出脉冲触发。当电源电压或负荷变动时,由于触发脉冲相位不同,晶闸管的导通角不同,整流输出的直流电压亦不同,以此来达到自动控制调整的目的。其原理方框图如图 2 所示。

**硒整流器** 整机包括主电路和控制电路两个部分。基本工作原理与硅整流器类似。主要不同之处是其

整流电路,它是由硒堆组成的三相桥式整流电路。主回路中控制扼流线圈的交流绕组串联于电源变压器的一次侧。当电源电压或负荷发生变化时,通过直流输出电压的测样、比较,经磁放大器放大后供给控制扼流线圈的控制绕组,用以改变其交流绕组的阻抗,达到自动控制调整的目的。其原理方框图如图 3 所示。

磁放大器的铁芯上设有交、直流绕组,通过直流磁场的变化来改变铁芯中合成的交变磁感应强度,从而改变交流侧磁感应强度。直流磁场愈强,铁芯愈易饱和,则铁芯中交流侧磁感应强度变化愈小。交流绕组上感应电动势小(感抗小),即压降小,而负荷上交流压降增大。磁放大器工作在铁芯磁化曲线上升陡度大的区域,利用磁化特性,通过改变较小的直流励磁电流,就可获得变化较大的交流电流,从而具有放大作用。

绝缘以提高其电气强度。

充气电缆所用的气体大多采用干燥氮气。氮气与浸渍纸绝缘直接接触,是绝缘的组成部分,其含水量不超过 0.03%,纯度在 99.95%以上。氮气不纯会使电缆绝缘酸化和受潮,并使介质损耗因数增加。近年来也有试用 SF<sub>6</sub> 负电性气体的,以提高绝缘层总体的击穿强度。

1933 年, C. J. 比佛 (C. J. Beaver) 开创了充气电缆,在英国得到了推广使用。虽然充气电缆有不少独特优点,如成本低,没有静态压力等,但由于它的电气性能不及充油电缆,更由于近年来固体挤压聚合电缆的发展,充气电缆已被逐渐淘汰。

### 参考书目

郑肇襄,王焜明主编. 高压电缆线路. 北京: 水利电力出版社, 1983

刘子玉. 电气绝缘结构设计原理. 北京: 机械工业出版社, 1981

(桑纪明)

chongyou dianlan anzhuang

**充油电缆安装** (oil - filled cable installation)

由于充油电缆的结构特点,其安装工作也与其他类型电缆有所不同,在电缆本体敷设和接头、终端的安装等环节,都需要采取一些特定的技术措施。

**电缆敷设** 充油电缆的敷设方法与其它电缆基本相同,但在敷设时需要注意电缆内部的油压变化。特别是当线路高差较大,电缆由低处往高处牵引敷设时,与电缆相接的压力箱要求有足够的油压,确保在高处的电缆内的油压高于最小允许压力(见电缆敷设计算)。在牵引电缆时,电缆经过拐弯处受到侧压力的作用,充油电缆耐受侧压力的能力与其内部油压有关,应保持在拐弯处的充油电缆内的油压不低于 0.2 MPa,否则充油电缆在拐弯时易被压扁。

**接头和终端的安装** 充油电缆的接头和终端的安装需要较长的时间,要在安装现场架设防风雨的帐篷或活动房,在接头坑内还要安装临时的排水泵。保持安装现场空气清洁和湿度较低是确保接头或终端质量的必要条件,一般可在帐篷或活动房内设置小型空调或空气干燥器,使空气湿度不超过规定值。此外还需要对压力箱进行补油和给接头与终端注油用的移动式电缆油真空去气装置。

充油电缆必须在正油压下进行连接,以免空气和潮气侵入内部。为此,在接头之前必须给压力箱补油,使其油压上升到一定值,使得切割电缆制作接头时在电缆线路任一点的油压不会下降至低于大气压。如果电缆线路由两段以上的电缆组成时,就要根据电缆线

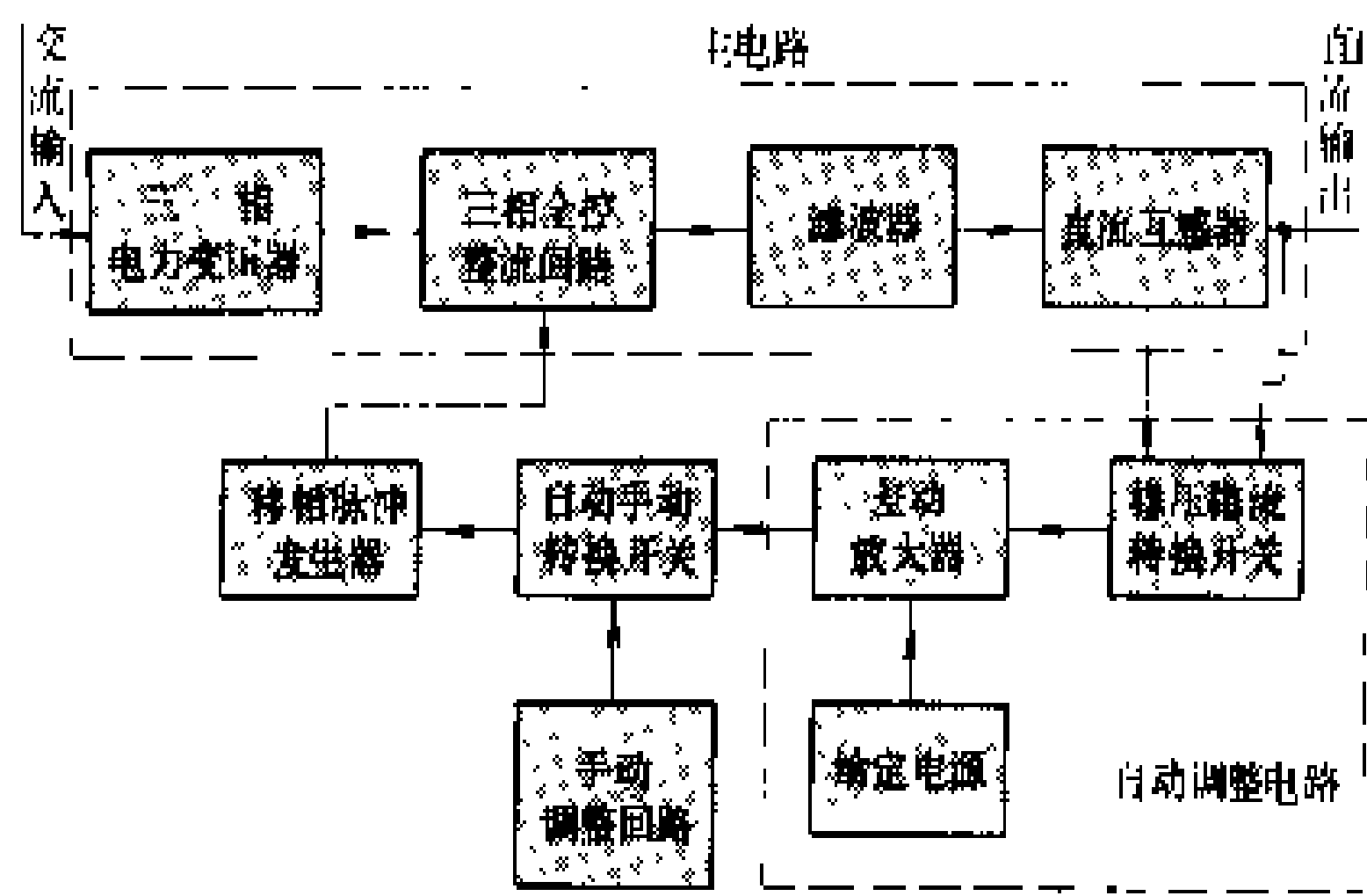


图 2 晶闸管整流器原理方框图

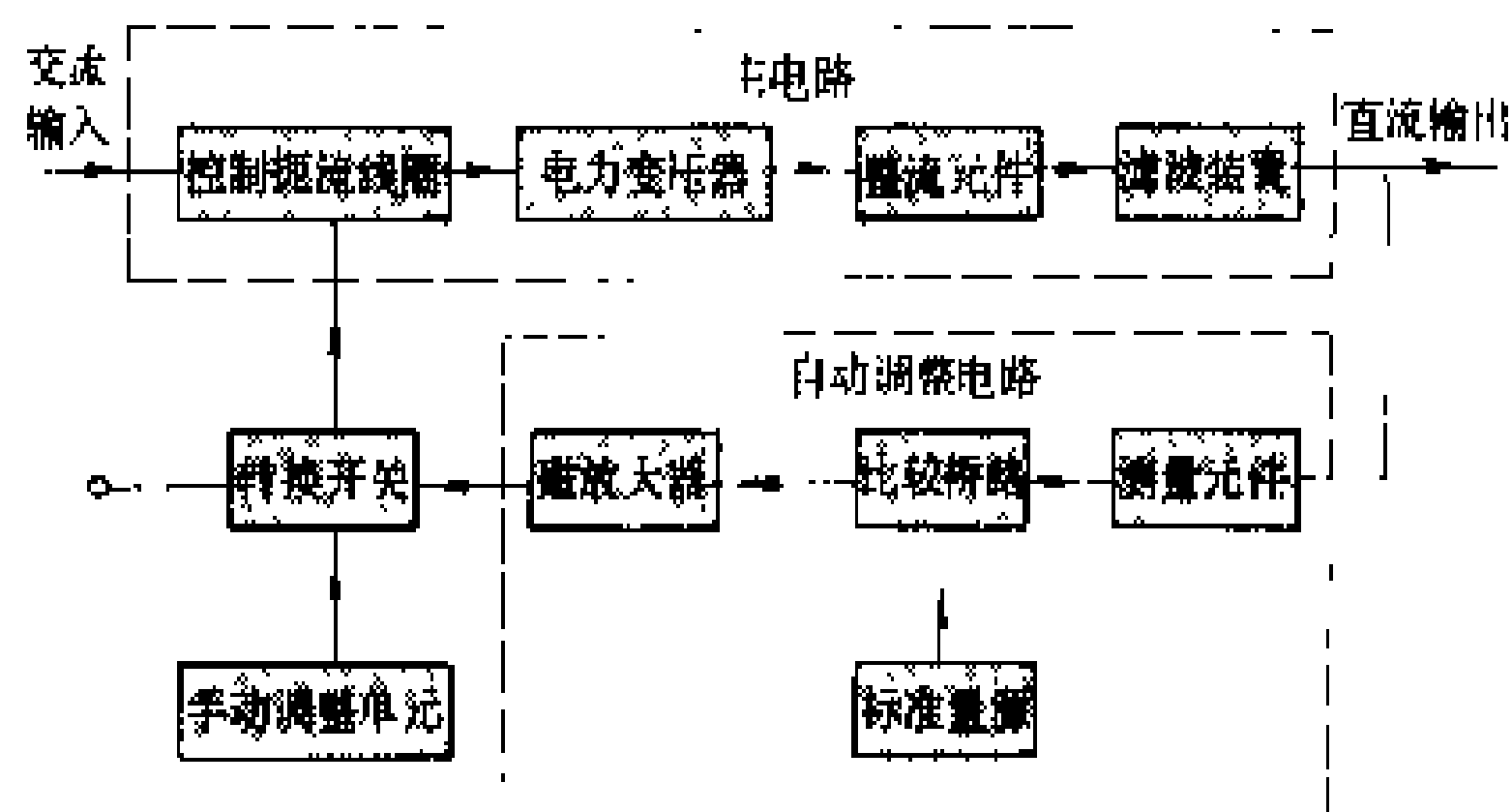
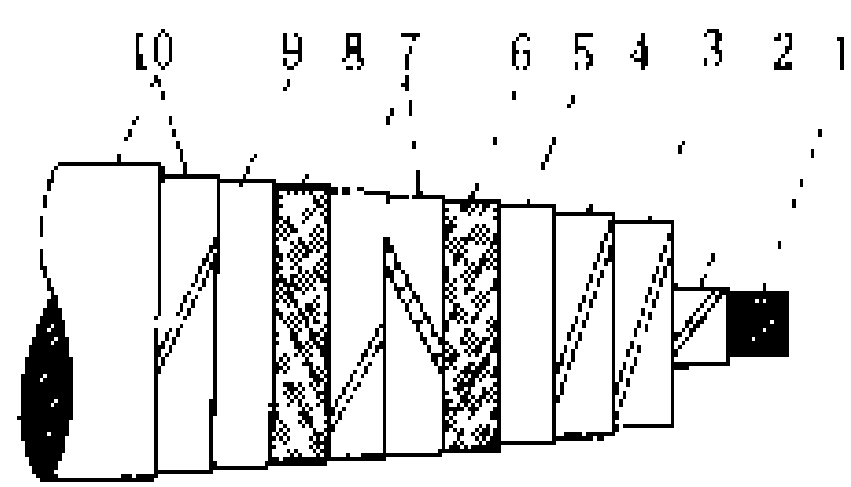


图 3 硒整流器原理方框图

(孙家福 徐国柱)

chongqi dianlan

**充气电缆** (gas - filled cable) 用高压力的氮气填充油纸绝缘中的气隙以提高绝缘性能的一种电力电缆。曾用于 33~138 kV 的电力电缆线路中,有些也用于 275kV 级的电缆线路。因为充气电缆绝缘中不含大量的易燃电缆油,对防火要求较高的场所(如隧道等)尤为适宜。图示为预浸渍纸绝缘单芯充气电缆结构。



预浸渍纸绝缘单芯充气  
电缆结构

1—线芯;2—线芯屏蔽层;3—纸绝缘;4—绝缘屏蔽层;5—第一层铅包;6,8—钢丝带;7—金属加强带;9—第二层铅包;10—外护层

充气电缆的油纸绝缘中的气隙被高压力的氮气填充后,其绝缘强度与氮气的压力成近似线性比例。按不同电压等级的气体工作压力的不同,充气电缆可分为低压、中压力和高压力三种,气体的压力分别

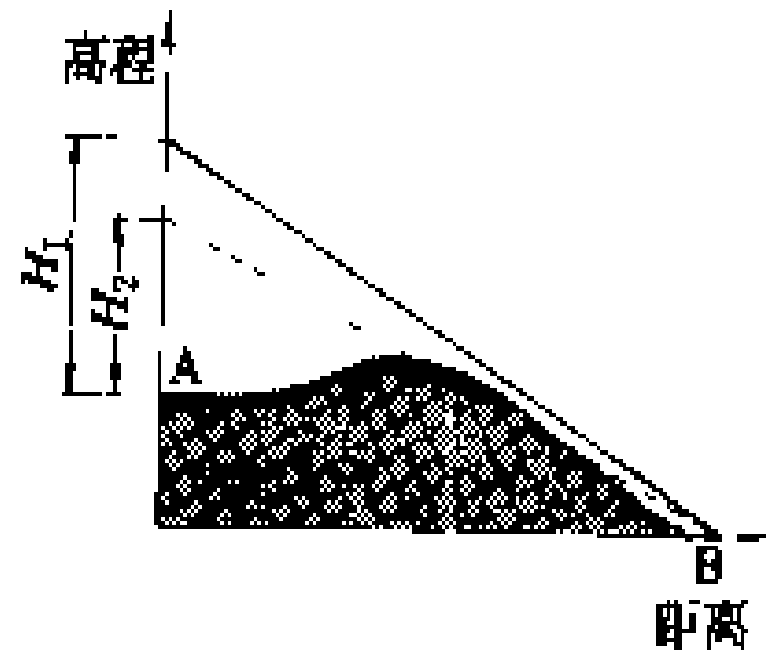
分别为 0.15 MPa、0.45 MPa 和 1.45 MPa。

充气电缆的游离电场强度与沿电场方向的气体间隙大小有关,间隙厚度愈小则游离电场强度愈高。因此,充气电缆和充油电缆一样,常使用薄纸带作为绕包

路的纵断面轮廓图仔细选择供油点的位置。如果线路比较平坦,油压问题并不严重,因为在平坦的路径上,可以将电缆内油的流量调节到很小的数值,因而油不会过分流失。对于非常陡的线路,如不采取合适的预防措施,电缆内的油就会很快流尽。相反,如供油点选择不当,也会造成电缆内部过高的油压。对于非常陡的线路,除了在线路设计时,在现场制作接头的过程中也必须十分注意保持适当的油流。如油流量过大,则在接头工作尚未进行至能够将油流止住的阶段之前要采用冷冻法阻止油流。

在平坦的线路上制作接头时,供油的压力箱应放在离开接头处所能允许的较远位置,以使油流经一段较长的电缆以减小油流速度和油的流失,但也不能放得太远而使油流降低到小于接头时所要求的油流。

例如有一如图所示的电缆线路。在B点制作接头时,为保证线路上任一点的油压均大于大气压,则布置在A点的压力箱的压力可按下述方法来确定。由B点向纵坐标作一射线(图中实线),射线不能低于线路上的凸出部分,它与纵坐标的交点即为该压力箱相对于A点的最低允许压力的油柱高度 $H_1$ 。如油压下降至 $H_2$ ,则射线(图中虚线)与电缆线路的轮廓相割,此时在射线以上的这部分电缆内出现负压,这种情况在任何时候都是不允许的。如果 $H_1$ 的值超过了电缆或压力箱本身的最高允许压力,则必须采用冷冻法堵油保压。对敷设在落差较大的垂直竖井中的电缆,在安装接头或终端时则必须采用真空法或冷冻法防止空气和潮气侵入电缆内部。



根据线路轮廓确定供油压力的示意图

在连接工作完毕后,立即对接头或终端进行真空处理。在抽真空过程中,要求在真空状态下排除接头或终端内渗出的油,否则渗出的油浸没部分或全部绝缘后会影 响绝缘中水分和空气的排出。真空处理完毕后,将经过真空去气处理并检验合格的新电缆油注入接头或终端。在任何时候都不要将新电缆油直接用油泵注入电缆内,因为由油泵输出的油的压力是脉动的,对电缆可能造成危害。此外,当油泵事故停车时,会使电缆失去压力面进气,因此新电缆油必须通过压力箱向电缆和接头或终端注油,以获得稳定的油压并防止失压。

将接头或终端注满电缆油并使油压恢复正常油压后,对接头或终端的封铅进行检漏,合格后再继续安装其外部的部件如保护匣等。在回填接头坑之前对接头

的壳体作10 kV、1 min 直流耐压试验,合格后再填平接头坑。

(王煜明)

chongyou dianlan gongyou zhuangzhi

充油电缆供油装置 (oil feeding equipments for oil-filled cable)

使充油电缆内部油压保持在允许范围内的装置。当充油电缆线路的负荷电流变化或环境温度变化时,会使电缆内部电缆油的体积膨胀成收缩,电缆内部的油压就会随之升高或降低。当电缆油膨胀时,电缆油在膨胀压力作用下流入供油装置;反之,当电缆油体积收缩时,在供油装置内部压力作用下使电缆油流入电缆内部,从而使充油电缆内部的油压保持在规定的允许范围内。根据结构和工作原理的不同,供油装置一般可分为:重力供油箱、压力供油箱、外气压供油箱和电缆油泵站四大类。

重力供油箱 利用它本身的安装地点与电缆线路之间的相对位差所产生的重力来保持充油电缆油压的供油装置。其特点是供油压力几乎与供油吞吐量的大小和环境温度无关,电缆内部各处的油压仅与供油箱中的油位与该处高差有关。重力供油箱的结构示意如图1所示。其主要部件是一组具有伸缩性的元件,每个元件由两片金属波纹薄板焊接而成。每个元件由分支油管与总油管相连。元件内充满与电缆相通的电缆油。在箱壳与元件之间充有与箱外大气相通的保护元件

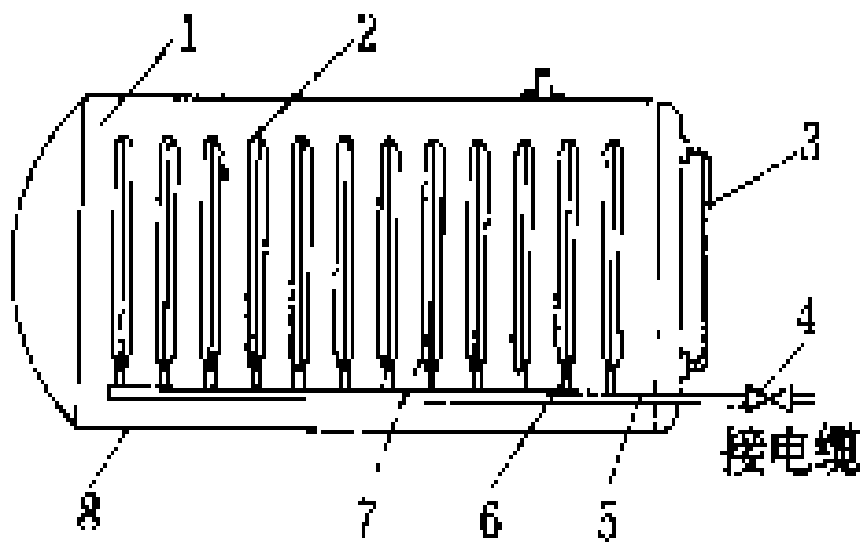


图1 重力供油箱结构示意图

化能指示重力供油 1—保护油;2—伸缩性元件;3—油位箱的吞吐量。当电 计;4—阀门;5—总油管;6—分支油管;7—电缆油;8—箱壳

体积膨胀而使油的压力增大时,电缆油便流入元件中,于是元件的体积也增加,元件外部油的油面随之升高。反之,电缆温度下降电缆油体积收缩而使油压力降低时,元件中的油在重力作用下流入电缆,于是元件的体积也缩小,元件外部油位随之下降。这样就可使电缆内部的油压保持在规定的范围内。重力供油箱的缺点是体积较大,需要安装在一定的高度才能保持电缆所需的油压范围。

压力供油箱 内部充有一定压力的气体(一般为二氧化碳)的电缆供油装置,简称压力箱,其结构示意图见图2。压力箱的弹性元件也是由两片波纹金属片焊接而成,每个元件之间互不相通。在箱壳与弹性元件之间的空间充满电缆油并与电缆相通。当电缆温度上升,

电缆内油体积膨胀致使油压力提高时，电缆内的油就流入压力箱并压缩弹性元件，元件内气体受压缩后压力相应增高，直到压力箱容纳全部因膨胀而增加的油

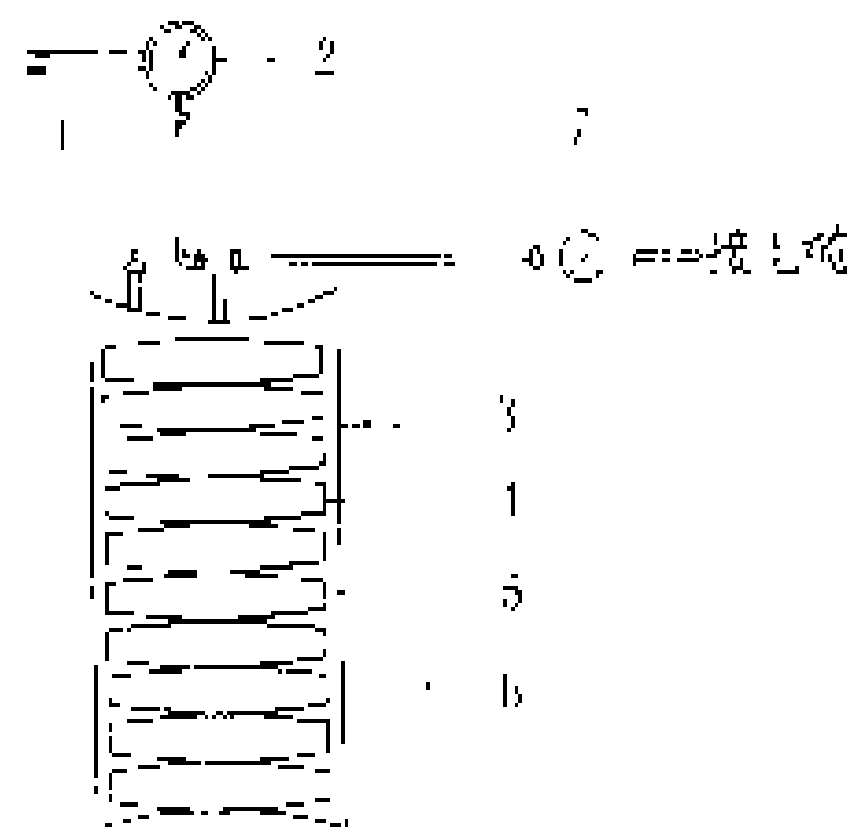


图2 压力供油箱结构示意图

1—警报电路；2—压力表；3—箱壳；4—弹性元件；5—压缩气体；6—电缆油；7—阀门

体积为止。此时电缆的油压不再继续增加。反之，当电缆温度下降，电缆内油体积收缩而压力下降时，弹性元件内气体膨胀迫使压力箱内的油流入电缆补充因油的收缩而减少的体积，元件内气压也随之下降，直到电缆内油的收缩量得到全部补充

为止。此时压力箱元件内气体压力不再继续下降。这样，压力箱就使电缆内部的油压保持在允许范围之内。

由于压力箱弹性元件内的气体体积较小，因此工作时供油压力随供油量和温度的变化比重力供油箱的供油压力的变化要大得多，从而供油量也比同体积的重力供油箱的供油量要少。压力供油箱只适用于线路高差比较小的充油电缆线路，但它不象重力供油箱那样必须安装在线路的最高点，而可装在沿线路任何合适的地点。

**外气压供油箱** 将压力气体充在密封的箱壳与弹性元件之间，而电缆油则被灌在弹性元件之内的电缆供油装置。由于箱壳的机械强度比弹性元件的大，且箱壳与弹性元件之间空间的容积也大，因此可充入较多的气体，并且可提高气体的初始压力，从而提高了供油压力和减小了供油压力的变化范围，适用于中油压充油电缆线路。

**电缆油泵站** 重力供油箱、压力供油箱和外气压供油箱只适用于自容式充油电缆，对于供油压力更高、供油量更大的钢管充油电缆就不适用了。因此钢管充油电缆均采用自动控制的油泵站供油以维持油压。自动油泵站一般由贮油罐、供油系统和信号与示警系统等部分组成。先进的自动油泵站能以压力模式和限流模式运行。以压力模式运行时，油泵站在所要求的压力下向电缆供油以保持电缆的油压在允许的工作范围内。在电缆大量漏油时，自动油泵站则自动进入限流模式运行，使油的流失量减少到最低限度，同时又能使故障电缆维持一定的油压，从而防止空气和潮气侵入电缆。对于大长度海底自容式充油电缆，如加拿大不列颠哥伦比亚省西海岸至温哥华岛的 525 kV 自容式充油电缆，由于供油量很大，也采用自动油泵站供油。

#### 参考书目

飯塚喜八郎，電力ケーブル技術ハンドブック，東京：株式会社電気書院，1974

(王焜明)

chongyou dianlan youlu fenduan

#### 充油电缆油路分段 (sectionalization of hydraulic system of oil-filled cable)

使充油电缆线路的油压保持在允许范围之内和在事故时为防止电缆油大量流失而采取的一种措施。油路分段的方法，一般有将油路分隔成若干油段或增加供油点将油路分成若干供油段的两种方法。

当自容式充油电缆线路的高差较大，在线路低处的电缆内的油压如超过规定上限值时，通常是用塞止电缆接头将电缆线路的油路分隔成若干供油段，使每一供油段内的油压处在允许范围之内。

电缆内部的暂态油压的最大值与供油段的长度的平方成正比(见电缆供油装置允许供油压力计算)。当线路的供油长度较长时，暂态油压最大值会超过允许值，此时常采用在电缆线路两端同时供油的方法，即将原来由一端供油时的供油长度分为等长的两段，从而暂态油压的最大值就降低至原来的 1/4。这是最简便的方法，不需要任何特殊的接头。如线路更长，采用此法仍不能满足要求时，则要求在线路的适当地点安装特殊的接头，将整个油路分隔成两段以上的供油段，以降低暂态油压的最大值。这种能把油路分段的特殊接头一般有塞止电缆接头和供油电缆接头两种。

**供油电缆接头**是使电缆油能从供油装置进入电缆油道而又不使电缆的油路在该接头内被隔断的一种接头。由于要求不隔断油路，故供油电缆接头的结构要比塞止电缆接头的简单，其内部电场分布也比较均匀，所以比塞止电缆接头要安全可靠。对于三芯自容式充油电缆而言，直线电缆接头就可作为供油接头之用，因为三芯充油电缆的油路是在金属套内的三个缆芯之间，可通过接头的外壳直接与供油装置接通。但对于单芯电缆，它的油路在导体中心，必须经过绝缘层才能与供油装置接通，因此要采用不同于直线电缆接头的特殊的供油接头。

当电缆线路受到严重外力破坏时，电缆内部的油会大量流失而使绝缘受到不利影响。为此，当线路特别长时，需要安装塞止电缆接头分隔油路，以减小受到损害的电缆的长度。

#### 参考书目

飯塚喜八郎，電力ケーブル技術ハンドブック，東京：株式会社電気書院，1974

(王焜明)

chuanlian buchang xitong xiezhen

## 串联补偿系统谐振 (resonance effects in series compensation system)

在采用串联补偿的系统中,有可能出现次谐波谐振、次同步共振、感应电动机自励磁和同步电机自励磁等谐振现象。在采用串联补偿时,须设法防止这些谐振现象的发生。

**次谐波谐振** 频率为系统额定频率的分数倍数的谐振。串联补偿装置的电容器的容抗与系统的感抗串联,构成一个串联谐振回路,其自振频率为  $f_s = f \sqrt{X_c / (X_L + X)}$ , 式中  $f$  为系统额定频率,  $X_c$ 、 $X_L$  和  $X$  分别为额定频率下每相串联电容器的容抗、线路的感抗和发电机、变压器及负荷的等值感抗。由于一般线路的补偿度  $X_c / X_L < 1$ ,  $f_s < f$ , 所以可能出现的谐振是次谐波谐振。在串联补偿系统中,投入空载变压器和来自系统的冲击或扰动等都可能引起次谐波谐振。

在串联电容器的负荷侧投入空载变压器时,由于变压器的励磁涌流使串联电容器充电获得直流偏压,这一偏压与电源电压叠加促使变压器铁芯随后在反方向达到饱和,使电容器反方向充电从而又获得反方向直流偏压,如此重复循环,即会在变压器端出现连续的次谐波谐振,可能导致危险的过电压和过电流。这是一种非线性的铁磁谐振现象。(见铁磁谐振过电压)

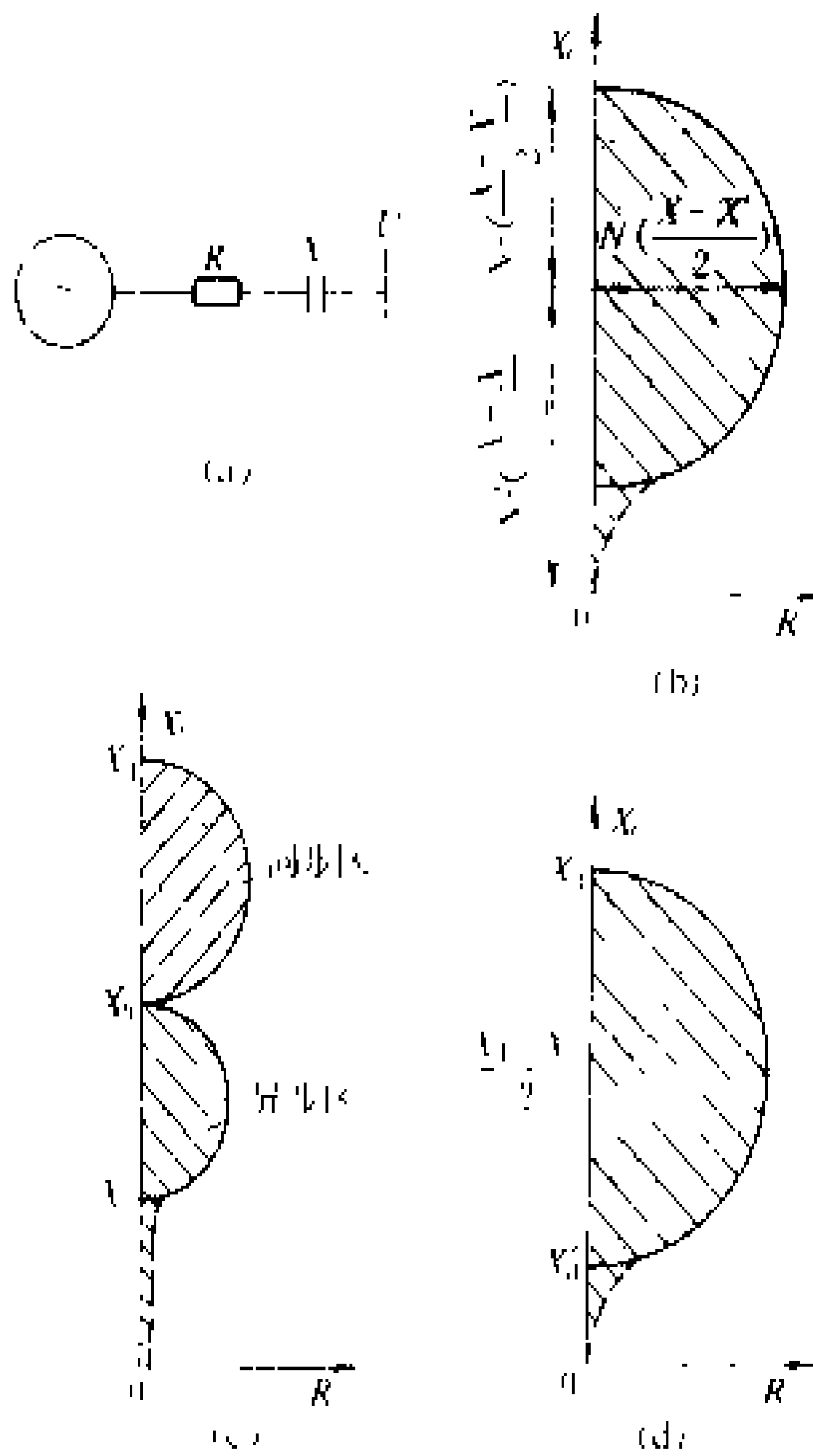
在有串联补偿的系统中,任何冲击或扰动均可能引起次谐波暂态电流的产生。次谐波电流通过线路、负荷、发电机等系统元件时,将受到电阻的正阻尼作用;通过交流电机定子绕组时,将在电机内建立起一个角速度为  $2\pi f_s$  的旋转磁场,由于  $f_s < f$  [同步电机:  $f_s = f$ ; 异步电机:  $f_s = f(1-s)$ ,  $s$  为其滑差], 电机对次谐波呈负阻尼效应。在一般情况下,由于正阻尼大于负阻尼,次谐波电流在几个周期内就衰减而消失;在特殊情况下,如线路的补偿度较高,负阻尼可能大于正阻尼,次谐波电流也就可能发展到危险的程度。

**次同步共振** 当次谐波电流在同步发电机内建立起旋转磁场,以  $2\pi(f_s - f)$  的相对角速度围绕转子旋转时,转子将受到一个频率为  $(f - f_s)$  交变力矩。如果  $(f - f_s)$  等于或十分接近发电机组轴系的任一自振频率时,就可能发生电气-机械共振的现象,即次同步共振。大型多级汽轮发电机组在额定频率范围内一般有 4~5 个自振频率,故最容易发生次同步共振。发生次同步共振后果严重,能在短时将发电机轴扭断,即使共振较轻,但重复次数较多时,也能使轴的机械寿命逐步耗尽。

**感应电动机自励磁** 在图 (a) 所示的串联补偿线路上起动感应电动机时,如果串联电容器的容抗  $X_c$  和系统的等值电阻  $R$  之值处在图 (b) 中斜线的范围以内,就可能发生电动机上升不到额定转速、电流异常增

大甚至使电动机过热烧坏的自励磁现象。感应电动机的自励磁也属于一种次谐波谐振现象。

**同步电机自励磁** 在连有凸极或隐极同步电机的串联补偿线路上,如果串联电容器的容抗  $X_c$  和系统的等值电阻  $R$  之值处在图 (c) 或图 (d) 中的斜线范围内,就可能发生过电流和过电压的自励磁现象。同步



交流电机自励磁区域

(a) 串联补偿系统简化接线; (b) 感应电动机自励磁区域; (c) 凸极同步电机自励磁区域; (d) 隐极同步电机自励磁区域

$U$ —恒定的母线电压;  $X_c$ —串联电容器容抗;  $R$ —系统等值电阻;  $X$ —感应电动机电抗;  $X'$ —感应电动机暂态电抗;  $N$ —感应电动机转速标么值;  $X_d$ —直轴同步电抗;  $X_q$ —交轴同步电抗;  $X_d'$ —直轴暂态电抗;  $X_s$ 、 $X'$ 、 $X_d$ 、 $X_q$ 、 $X_d'$  内都包括线路电抗

电机的自励磁是一种参数谐振,是由于系统中的电抗在  $X_d$  与  $X_q$ 、 $X_d$  与  $X_q$  或  $X_d'$  与  $X_q$  之间作周期性变化引起的。凸极同步电机的自励磁有同步和异步两种,同步自励磁时谐振电流是基波电流,所产生的磁场与转子同步旋转;异步自励磁时谐振电流是次谐波电流,所产生的磁场以略低于转子的转速旋转。

**防止谐振措施** 主要有: ①设计串联补偿装置时采用合适的补偿度; ②采用次谐波保护,在开始发生次谐波谐振时将串联补偿装置的并联断路器合上,或将线路切除; ③在配电线路的串联电容器旁并联一个阻尼电阻,其值一般小于或等于 10 倍电容器容抗; ④在发电机组升压变压器的出线上,根据机组轴系的自然扭振频率加装阻塞滤波器,阻挡可能引起次同步共振



的几个次谐波电流进入发电机内；⑤同步电机采用励磁控制来抑制次谐波谐振；⑥采用静止补偿装置抑制谐振。

参考书目

Miller T J E. Reactive Power Control in Electric Systems. New York: John Wiley & Sons, 1982  
(马延绪)

chuanlian buchang zhuangzhi

串联补偿装置 (series compensating device)

串联在输电线路中以补偿线路感抗的由电容器及其保护、控制等设备组成的装置, 全称为串联电容补偿装置。其作用相当于缩短线路的电气距离, 达到提高输电线路送电能力, 改善配电线路电压质量, 合理分布并联线路或环网中的负荷等目的。其优点是: ①能提高电力系统的稳定性; ②补偿容量能随负荷变化无延时地连续调节, 调压效果较好; ③过载能力较强。缺点是: ①单位容量价格较贵; ②降低线损的作用较差; ③可能引起次谐波谐振, 次同步共振和异步、同步电机自励磁等谐振现象。(见输电网的无功补偿与电压调整)

基本组成 串联补偿装置主要由串联电容器、放电间隙、并联断路器或负荷开关、隔离开关、阻尼元件、辅助设备和绝缘平台等设备组成。容量大于 10 Mvar 的串联补偿装置的典型接线如图 1 所示。

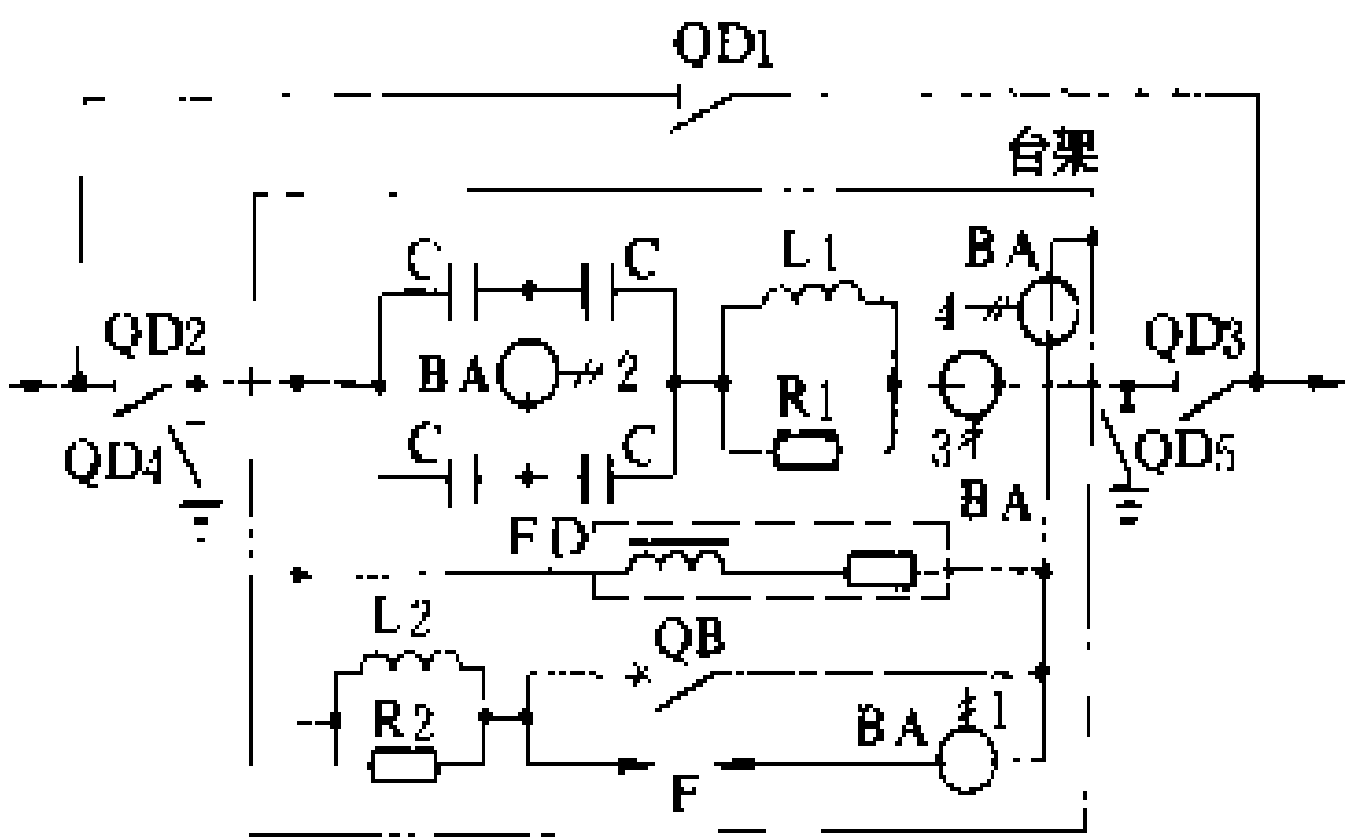


图 1 串联补偿装置的典型接线图  
(容量大于 10 Mvar)

C—串联电容器; QD1—旁路隔离开关; QD2、QD3—隔离开关; QD4、QD5—接地隔离开关; FD—放电装置; F—放电间隙; QB—并联断路器或负荷开关; L1、L2—阻尼电抗器; R1、R2—阻尼电阻; BA—电流互感器; 1—放电间隙保护; 2—桥式差动保护; 3—次谐波和过负荷保护; 4—平台故障保护

(1) 串联电容器。其基本结构与并联电容器相同。串联电容器组容量按补偿容抗、最大负荷电流及其短时过载能力来选择。单台电容器容量有 10、20、45、70 kvar, 也可生产更大容量的电容器。因经常承受线路持续性过负荷和通过短路电流时引起的过电压, 串联电

容器需有较高的过载能力, 并能通过规定的特殊试验项目。(见串联补偿装置试验)

(2) 放电间隙。并联在电容器两端以防止线路故障时电容器两端产生过电压的保护装置, 有自灭弧间隙和非自灭弧间隙两种。

(3) 并联断路器或负荷开关。用于投入与退出串联电容器, 当非自灭弧间隙动作或自灭弧间隙不能灭弧时, 并联断路器应自动或手动合闸使电弧熄灭。断路器的断口绝缘强度大于放电间隙的 10% 以上即可。在 110 kV 以下线路上, 串联补偿装置容量不大, 可用并联负荷开关代替断路器, 并配用自灭弧间隙保护电容器。

(4) 阻尼元件。包括阻尼电抗器和阻尼电阻。当放电间隙动作或并联断路器合闸时, 阻尼元件可以限制电容器放电电流的幅值和频率。阻尼电感一般约为数微亨到 1~2 mH, 阻尼电阻约为零点几欧到几欧。

(5) 辅助设备。包括放电装置、信号传递装置、继电保护装置和保护用电流互感器等。放电装置是与电容器并联的一个铁芯电抗线圈和电阻的串联回路, 用以释放重合闸或强行补偿前电容器上的残留电荷; 信号传递装置用以传递绝缘平台与地面之间的动作信号或命令, 有光电式、压缩空气式或绝缘杆式; 继电保护装置有防止电容器内部故障的桥式差动或横联差动保护, 防止电容器过负荷的过负荷保护, 防止次谐波振荡的次谐波保护和防止串联补偿装置对平台击穿或闪络的平台故障保护等。

(6) 绝缘平台。用以安装 35 kV 及以上的串联电容器及其辅助设备, 有悬挂式和支撑式两种。当串联补偿装置的容量较大时, 在主平台上尚需分设几个辅助平台。当串联补偿装置容量很大时, 有时需分设几个主平台。

应用原理 串联补偿装置主要用于改善 110 kV 及以下线路的电压质量, 提高系统的稳定性和线路的

输电容量, 合理分布并联线路或环网中的负荷。

(1) 改善 110 kV 及以下线路的电压质量。串联补偿装置

图 2 串联补偿线路示意图

$\dot{U}_1$ —送端电压;  $\dot{U}_2$ —受端电压;  $R_L$ —线路电阻;  $X_L$ —线路感抗;  $X_C$ —串联电容器容抗;  $i$ —负载电流;  $\cos\varphi$ —负载功率因数

$$\Delta U = I [R_L \cos\varphi + (1 - K_C) X_L \sin\varphi]$$

式中  $K_C = X_C / X_L$ , 称之为补偿度, 一般为 1~4。由此式可以看出, 串联电容器可使线路电压降  $\Delta U$  减少

$K_c I X_L \sin \varphi$ 。补偿度  $K_c$  越高, 线路  $X_L/R_L$  比值越大, 负载功率因数  $\cos \varphi$  越低, 补偿的效果就越显著。接入串联补偿装置通常可使受端电压提高 10%~20%。与并联补偿装置相比, 提高线路末端电压以采用串联补偿装置比较经济, 但如果目的是为提高系统电压水平或减少线路有功损耗, 则以选用并联补偿装置为宜。

(2) 提高系统稳定性和输电容量。线路两端电压  $\dot{U}_1, \dot{U}_2$  恒定时线路的输电容量为  $P = U_1 U_2 \sin \delta / (X_L - X_c) = U_1 U_2 \sin \delta / [X_L (1 - K_c)]$ , 其中  $\delta$  为两端电压的相角差,  $X_L$  和  $X_c$  为线路感抗和串联电容器容抗,  $K_c = X_c / X_L$  为补偿度, 此处一般取 25%~70%。从上式中可以看出, 串联补偿可在同一相角差情况下使输电容量  $P$  提高  $1/(1 - K_c)$  倍, 静态稳定极限输送容量也相应增大。另一方面, 在输送同一容量  $P$  时, 由于  $\delta$  变小, 系统抗扰动裕度增大, 所以系统的暂态稳定性也有所提高。

(3) 合理分布并联线路或环网中的负荷。在由不同导线截面线路组成的或不同电压线路经变压器组或的闭合电网中, 采用串联补偿可使负荷分布更加合理, 线路有功损耗趋向最少。

发展简况 1928 年美国纽约电力和照明公司在 33 kV 线路上首先应用了串联补偿装置。到 20 世纪 40 年代, 日本、瑞典、苏联等国也在 3~35 kV 配电网中推广应用串联补偿装置。1950 年瑞典在斯塔德福森 (stadsforsen) 到哈尔斯卑尔格 (Hallsberg) 长 480 km 的 220 kV 线路上建造了第一个 220 kV 串联补偿站, 补偿度为 20%, 使该线路的输送容量提高了 25%。1956 年苏联建成第一个 400 kV 串联补偿站。80 年代, 巴西在 1000 km 长的 750 kV 线路上也采用了串联补偿。为提高系统暂态稳定, 美国在 1979 年研究采用了氧化锌非线性电阻阀片作为过电压保护, 使串联电容器能在线路故障后瞬间投入, 从而充分发挥了串联补偿装置对提高系统稳定的作用。中国自 1954 年起在东北、华北和华东几个地区的 6~35 kV 线路上开始采用串联补偿。1966 年在新安江水电站到杭州的 220 kV 输电线路投运了中国第一个 220 kV 串联补偿装置。1972 年在刘家峡—关中输电线路 (中国第一条 330 kV 输电线路) 上采用了补偿度为 30% 的串联补偿装置, 总容量为 60 Mvar, 分设在秦安和汤峪两个变电所内, 使线路的输送容量提高了 20%, 其平台采用悬挂式, 以适应抗震要求。

参见彩图插页第 13 页 41 图。

#### 参考书目

曹荣江编, 配电网中的串联补偿装置, 北京: 中国工业出版社, 1964

浙江省电力中心试验所高压试验组, 浙江大学发电

教研组编, 串联电容补偿装置在电力系统中的应用。

北京: 水利电力出版社, 1971

(满文宗)

chuanlian buchang zhuangzhi baohu

## 串联补偿装置保护 (series compensating device protection)

串联补偿装置故障或异常运行时, 为减轻其损坏程度和对系统的影响而采用的动作于跳闸或信号的自动装置。一般包括电容器的过电压保护、过负荷保护及内部故障保护, 次谐波保护, 放电间隙的保护和平台故障保护。保护回路见串联补偿装置中的图 1。

电容器过电压保护 由并联在电容器组两端的放电间隙构成。当线路故障电容器组两端的电压超过规定值时, 放电间隙击穿放电, 保护电容器组不受危害。放电间隙有非自灭弧间隙 (如由石墨电极组成的普通空气间隙) 和自灭弧间隙 (如磁吹式或气吹式间隙) 两种。自灭弧间隙能在故障消失后使电容器自动投入。按国际电工委员会 (IEC) 标准规定, 放电间隙的整定电压 ( $u_p$ ) 与电容器 1s 工频试验电压  $u_s$  的关系为: 无断续弧时  $u_p \leq 0.85 u_s$ ; 有断续弧时  $u_p \leq 0.7 u_s$ , 通常为电容器额定电压的 2.5~4 倍 (不超过 4 倍), 但在系统正常运行 (包括电容器投入、系统发生摇摆和线路自动重合闸时的暂态过程) 时放电间隙应不动作。为限制放电间隙动作时的放电电流幅值和频率, 并使其加速衰减, 在放电间隙与电容器的串联回路中装设阻尼元件 (阻尼电抗器和阻尼电阻)。有些国家采用氧化锌非线性电阻阀片作为过电压保护, 其优点是结构简单, 能在线路故障后瞬间投入电容器, 比常用的放电间隙能更有效地提高系统的暂态稳定性和线路的输电能力。

电容器过负荷保护 通常仅装设在一相上, 由几只电流继电器和时间继电器组成。当过负荷的电流与持续时间超过电容器的承受能力时, 保护动作使并联断路器合上, 将电容器退出。有的再另加一组能模拟电容器温度的过热保护, 以应付 50% 以下的轻度过负荷。

电容器内部故障保护 包括内部元件保护和桥式差动或横联差动保护。电容器内部元件保护由装在外壳内每个元件上的单独熔丝构成, 元件击穿时熔丝熔断将故障元件隔离。桥式差动保护由装在两串电容器中部连线上的电流互感器和电流继电器组成, 正常时连线两端电位平衡, 无电流通过, 当电容器元件击穿熔丝熔断后, 两端电位不平衡, 保护动作。当不平衡程度较轻电容器上的过电压不大于 10% 额定电压时, 桥式差动保护一般只发信号; 当击穿元件多、不平衡严重、电容器上的过电压大于 10% 额定电压时, 桥式差动保

护动作合上并联断路器,将电容器退出。横联差动保护由装在每相两串并联连接的电容器上的电流互感器和接在两互感器二次侧差电流回路上的电流继电器组成,正常时差电流接近于零,故障时两串电容器上的电流不平衡,产生差电流,使横联差动保护动作于信号或合上并联断路器。

次谐波保护 由一组对次谐波电流敏感的继电器构成。当发生次谐波谐振时,次谐波保护动作合上并联断路器,将电容器退出。

放电间隙保护 由电流继电器、时间继电器、电流互感器和并联断路器组成。当放电间隙动作不能灭弧时,该保护动作使断路器合闸,以防止烧坏放电间隙。

平台故障保护 主要由串联补偿装置一端接主绝缘平台连接线上的电流互感器和电流继电器组成。当串联补偿装置的任何一点对平台击穿或闪络时,该保护均动作使并联断路器合闸,将串联补偿装置旁路。平台上、下通常用光导纤维来传递保护和控制信号。

参考书目

Miller T J E. Reactive Power Control in Electric Systems. New York: John Wiley & Sons, 1982

(浦文宗)

chuanlian buchang zhuangzhi shiyan

**串联补偿装置试验** (series compensating device tests) 在制造、安装和运行中采用测试设备鉴定串联电容器和整套串联补偿装置的质量和性能是否符合设计、使用要求的试验。试验可分为元件试验和整套装置投运前的系统试验两部分。元件试验一般分为型式试验、出厂试验、交接试验和预防性试验四种。系统试验通常包括加电压加负荷试验、带负荷投切串联电容器试验、投入空载变压器试验、短路试验、感应电动机起动试验和串联电容器不平衡投入试验等。

元件试验 串联电容器的试验项目除下表所列的短时过电压试验、热稳定试验和放电试验三个特殊试验项目外,其余项目包括外观检查、密封性试验、电容测量、极间耐压试验、极对外壳耐压试验、损耗角正切值测量、内部放电电阻测量、冲击耐压试验、局部放电试验、极对外壳绝缘电阻测试等,与并联电容器的试验基本相同(见并联电容器试验)。与串联电容器配套的放电间隙和阻尼元件的试验,按具体装置的设计技术要求进行。

系统试验 主要包括:①加电压和加负荷试验,用以检验整套补偿装置各部分是否良好;②带负荷投切串联电容器试验,以观察补偿效果和放电间隙、并联断路器的动作性能是否符合要求;③投入空载变压器(或并联电抗器)试验,以观察是否出现铁磁谐振;④短路

试验,用以检验放电间隙的动作性能、阻尼元件的阻尼效果和继电保护的动作情况,在消弧线圈接地的系统中,观察是否发生串联谐振;⑤感应电动机起动试验,首先观察是否出现自励磁现象,然后在全负载下突然切断线路,又随即重合,检查全线电动机的自启动是否稳定;⑥串联电容器不平衡投入试验,将一相电容器短接,投入其他两相,检查线路上出现的零序分量和中性点电位有无过大偏移。在实际工程中,系统试验需根据具体情况进行部分项目或全部项目的试验,或补充新的试验项目。

串联电容器的特殊试验项目

试验项目	试 验 标 准	备 注
短时过电压试验	在额定频率下施加 $5U_n$ 、0.2s ( $U_n$ 为串联电容器的额定电压)	型式试验项目
热稳定试验	在额定频率下施加 $U_n$ 历时 48h 后,进行 $1.25U_n$ 保持 4h; $1.5U_n$ 保持 1h 时, $5U_n$ 历时 0.2s 30 次; $5U_n$ 历时 0.2s 加 $2.5U_n$ 历时 30 s 20 次。试验后介质损失角正切值 $\tan\delta$ 不得超过 0.0045	型式试验项目
放电试验	用直流电压充电至 $7U_n$ , 然后向限制放电电流到电容器额定电流 120 倍的电阻放电。型式试验进行 30 次, 出厂试验进行 3 次, 放电前和放电后作极间电压试验后, 电容变动量应不大于 2%	出厂试验及型式试验项目

(浦文宗)

chuanlian buchang zhuangzhi yunxing jianxiu

**串联补偿装置运行检修** (series compensating device operation and maintenance)

为保证串联补偿装置的安全经济运行而进行的巡视检查、操作、异常运行和事故处理以及定期停电检查、修理等工作。

串联补偿装置的运行 包括巡视检查、投切操作、异常运行和事故处理等内容。

(1) 巡视检查。一般分为定期检查、特殊检查和投运前的检查。定期检查内容包括仪表监视、设备外部检查和运行分析。其中仪表监视主要是对运行电流、电压和温度的监视,要严格控制串联电容器的各参数在制造厂所提供的允许范围内运行;设备外部检查项目主要有电容器外壳是否鼓肚、渗漏,电容器套管是否清洁、完整,放电间隙是否完好,引线连接处有无松动、发热、变色现象,有无异声,配套设备运行是否正常;



运行分析主要是对巡视中发现的问题进行分析,如电容器外壳轻微鼓肚、发生次谐波振荡、线路发生短路而放电间隙不动作等。当气象条件恶劣(如大雾、雷雨、冰雪、高温等)或发生故障时需进行特殊检查。投运前需检查设备是否具备带电投运条件。

(2)投切操作。一般宜尽量减少电容器的操作放电次数。进行投切操作时要注意:①并联断路器(负荷开关或隔离开关)的操作方式与一般的断路器相反,它是在分闸时而不是合闸时使电容器投入运行的,要防止误操作;②操作并联隔离开关时,操作人员不要站在电弧的发展方向,以防被电弧和铜末灼伤。

(3)异常运行和事故处理。最常见的异常情况是电容器渗漏油、外壳鼓肚,自灭弧间隙动作后不能自动灭弧而并联断路器又没有自动合闸,线路上出现电压上下波动的周期性振荡,小动物造成的闪络和污闪事故等。渗漏油会使电容器内油而下降,潮气进入导致击穿,故应及时处理。外壳鼓肚要分清是正常的热鼓冷缩还是内部故障所致,简单的区分办法是看普遍鼓肚还是个别鼓肚,普遍鼓肚一般属正常的热鼓现象,个别鼓肚则可能有内部故障。由于串联电容器内每个元件上都装有单独熔丝保护,电容器不大可能发生爆炸。自灭弧间隙动作后不能自动灭弧时,应立即将并联断路器合上,并安排停电检查间隙烧损情况。当线路出现次谐波谐振等周期性振荡时,应及时合上并联断路器来消除振荡,也可规定一些操作顺序来避免,如投空载变压器时先投变压器后投串联电容器。当发生小动物闪络、污闪等事故时,应按事故处理规程规定执行。

串联补偿装置的检修 通常检修工作量较少,主要是定期清扫、油漆,检查电容器渗漏油、外壳鼓肚情况,检查放电间隙烧损以及各连接部分的紧固等情况,并进行必要的修理和预防性试验,包括检测电容器的电容量,同时对其配套附属设备也进行必要的检修和测试(见串联补偿装置试验)。清扫周期可根据周围环境的污染情况及季节性特点来确定。

(浦文宗)

沿固定螺栓旋转,以缓和两侧的不平衡张力。采用瓷横担时,固定或绑扎导线的形式也有两种,一种是直接绑扎,另一种是在瓷件头部带有连接金具,用以悬挂线夹。

中国尚未制订瓷横担国家技术标准,根据已生产使用的成型产品的电气、机械性能技术数据,它与相同电压等级的普通线路绝缘子相比较,其特点是:①瓷横担的绝缘距离与爬电距离比较大,50%

全波冲击闪络电压和干、湿工频闪络电压较高;②瓷横担的瓷间隙大得多,属不击穿型绝缘子;③瓷横担的瓷体比较长,机械抗弯强度较低,考虑安全可靠系数后,允许的最大荷重一般比相同电压等级的普通线路绝缘子小,故瓷横担不适宜用于导线截面和档距较大的线路。常用的瓷横担为35 kV瓷横担、10 kV瓷横担和10 kV瓷拉棒三种,如图1所示。

瓷横担线路优点 瓷横担配电线路与用普通绝缘子架设的配电线路相比较,其主要优点为:①采用可转动结构,在线路断线时,导线张力的不平衡使瓷横担转动,从而有效地缓和断线事故的扩大;②线路的绝缘水平和防雷水平较高,事故率低;③瓷体易受风雨冲洗,自洁性好,且不会击穿,更换及维修量小;④施工、安装方便,同等杆高时可提高导线对地距离0.3~2.2 m

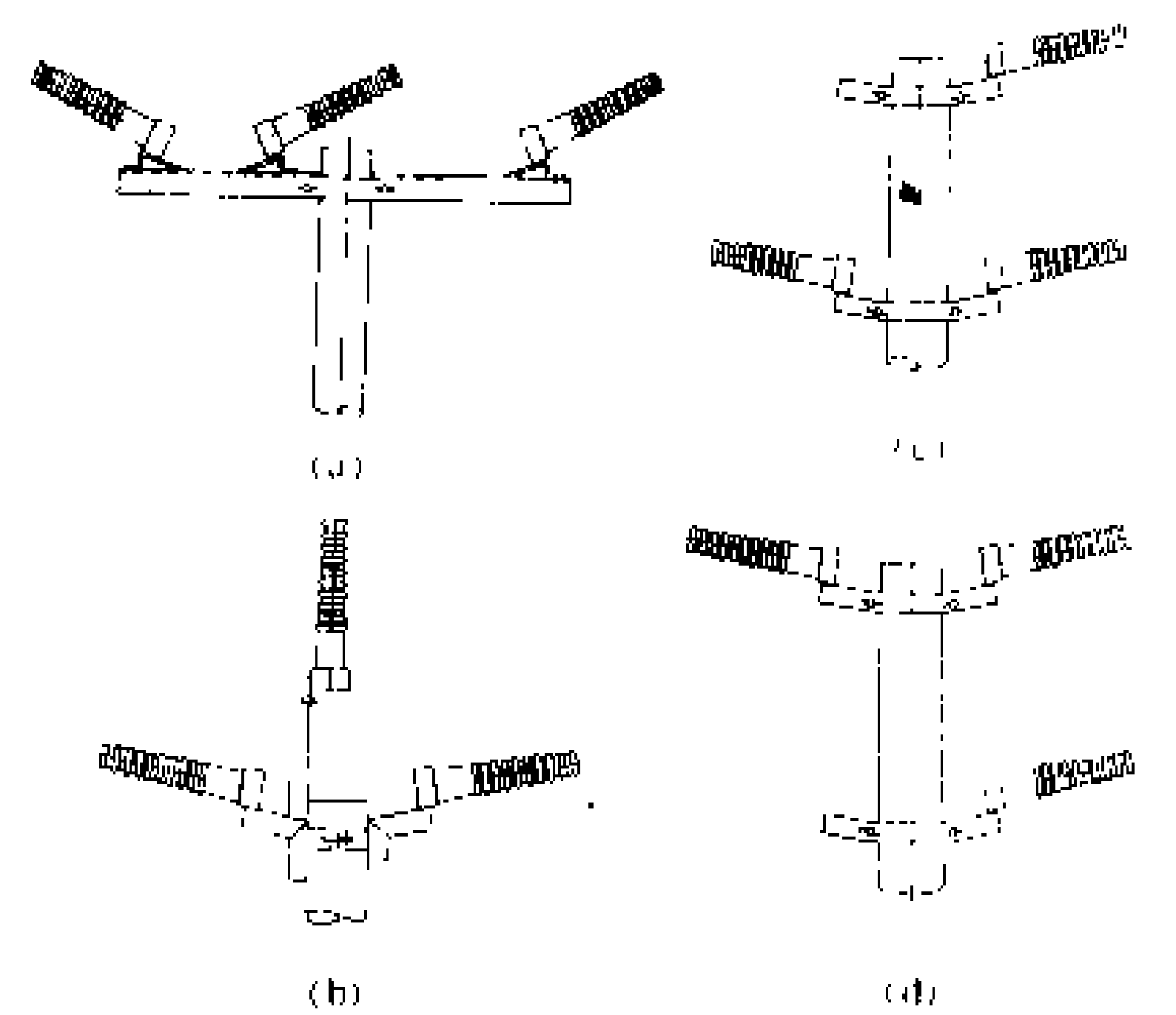


图2 瓷横担配电线路直线杆装置  
(a) 坦平型; (b) 三角型; (c) 上字型; (d) 下字型

chenglidan

**瓷横担** (porcelain cross arm) 一种用于电力架空线路的圆锥或圆柱形瓷质绝缘子。除具有与普通线路绝缘子相同的固定导线和对地绝缘的功能外,还可全部或部分代替铁质或木质横担。

种类和性能 瓷横担有带金属附件和不带金属附件两种。应用较多的中压及以上电压等级的瓷横担都带有金属附件。附件上有两个孔,一个孔供安装固定螺栓用,另一个接近其根部的孔的作用是当瓷横担受不平衡张力时,该孔上的螺栓受力被剪切而可使瓷横担



左右；⑤节约钢材、木材等原材料，并可降低单基杆塔造价10%~50%。

瓷横担线路架设与杆型 瓷横担线路架设前，对导线、瓷横担及支架需进行机械强度计算。其计算方法与普通绝缘子线路计算相似，但瓷横担上承受的作用力与普通绝缘子串不尽相同，特别应注意必须考虑瓷

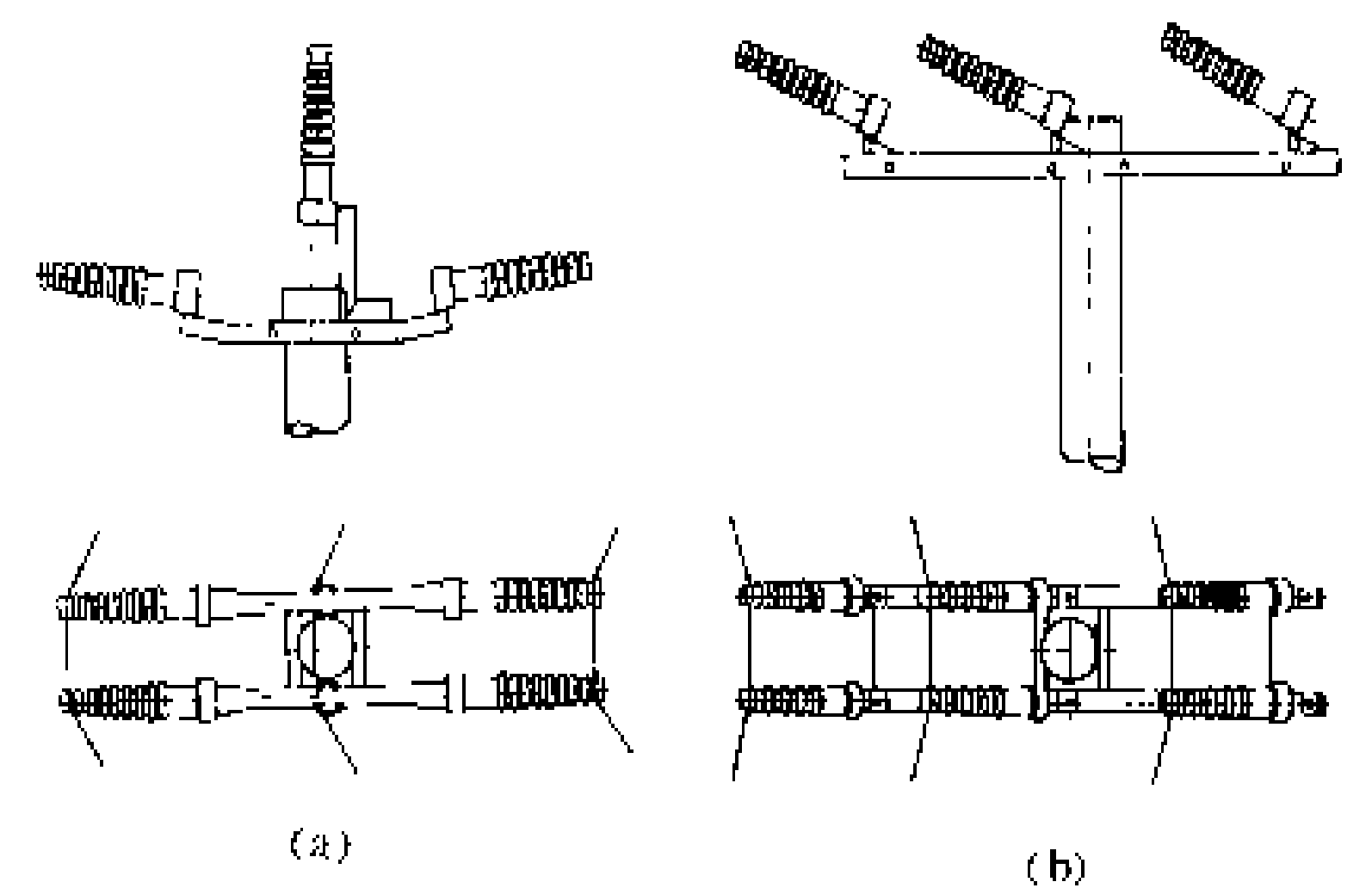


图3 瓷横担配电线路小转角杆装置  
(a) 三角型；(b) 矩平型

横担本身自重引起的弯矩。所选导线的截面和杆间档距必须满足使瓷横担有足够的安全系数( $>3$ )的要求。瓷横担常以水平或垂直方向安装在杆上，也可以不同角度装设，其湿闪电压值是随着装置方向与水平的角度增大而相应地降低。

瓷横担配电线路根据需要可采用多种杆型装置，常用的直线杆装置为矩平型、三角型、上字型及下字型，如图2所示。采用双瓷横担可构成小转角杆装置，

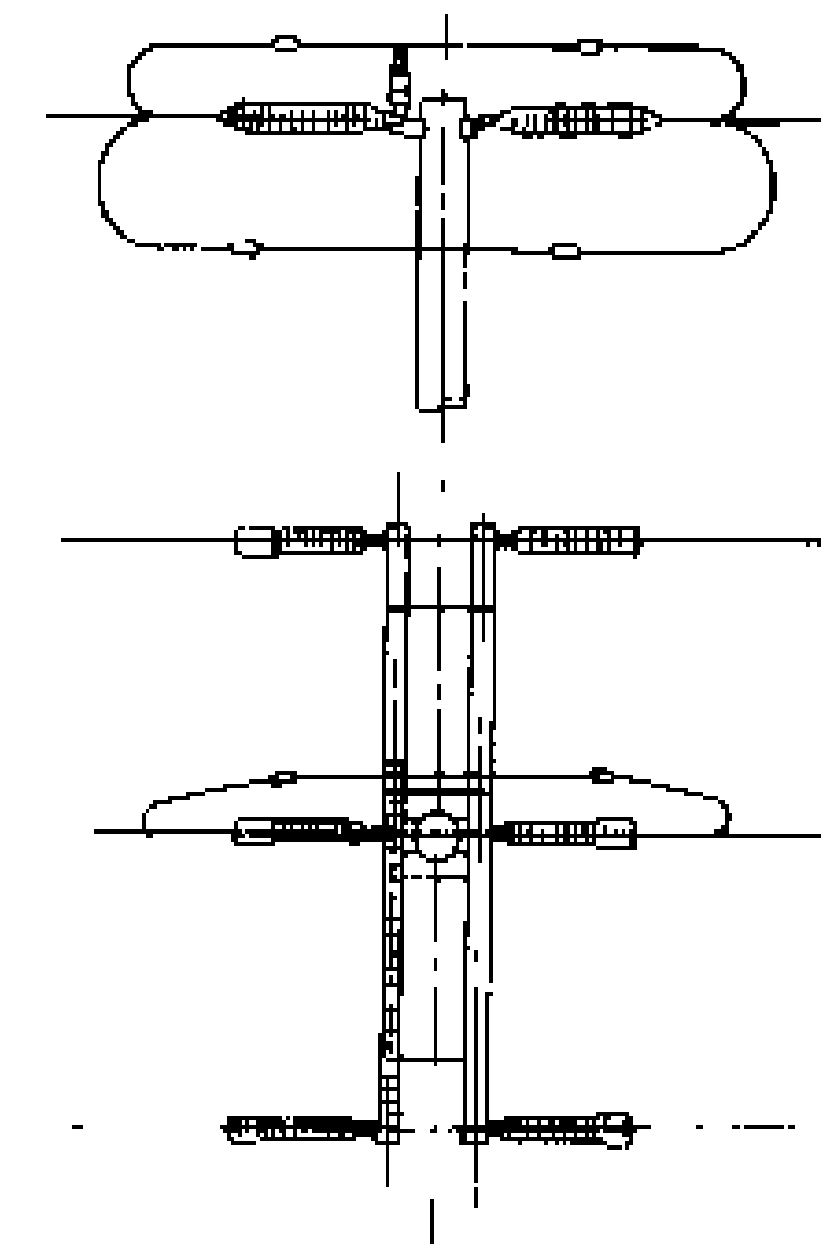


图4 瓷横担配电线路分段杆装置

如图3所示。而分段杆装置常用瓷拉棒来构成，如图4所示。

展望 20世纪60年代初，中国浙江省湖州市的电力部门开始将瓷横担应用于低压和中压配电线路，其后经过改进和发展，已在各地35 kV、10 kV 架空电力线路上采用，110 kV 和220 kV 输电线路上也

有少量使用。对于110 kV 及以上电压的架空线路或大截面导线、大档距的配电线路，要求瓷横担有较高的抗弯强度。目前，已开始应用硅橡胶等合成材料来替代原来的瓷质材料。

参考书目

上海供电局，瓷横担线路的设计和运行，北京：水

利电力出版社，1974

(金辅夏)

cichui bileiqi

磁吹避雷器 (magnet-valve surge arrester)

由碳化硅阀片和磁吹放电间隙串联组成的阀式避雷器。磁吹避雷器的保护性能优于普通阀式避雷器，其雷电冲击和操作冲击的保护比分别为1.54和1.5，一般用在110 kV 及以上的高压电力网中，也可用来保护绝缘较弱的旋转电机。在中性点有效接地的高压电力网中使用的磁吹避雷器，除了限制雷电过电压外，还可限制部分操作过电压。

磁吹避雷器所用的碳化硅阀片是由金刚砂与结合剂烧结而成的圆饼，避雷器的额定电压愈高，所用的阀片数愈多。保护旋转电机的磁吹避雷器中所用的是低温阀片，它的烧结温度在500℃以下，非线性系数 $\alpha$ 在0.2左右，但通流能力较低。保护高压变电设备的磁吹避雷器中所用的是高温阀片，它的烧结温度在1000℃以上，非线性系数 $\alpha$ 较高，可达0.24，但通流能力较高，可以用来释放某些操作过电压的能量。

磁吹放电间隙分为旋转电弧型和拉长电弧型(限流型)两类。高压磁吹避雷器的放电间隙由数十个单间隙串联而成，为了使电压沿各间隙分布均匀，通常将它们分成若干组，在每个间隙组上并联特性相同的均压电阻。旋转电弧型磁吹间隙的结构如图1所示。它的磁

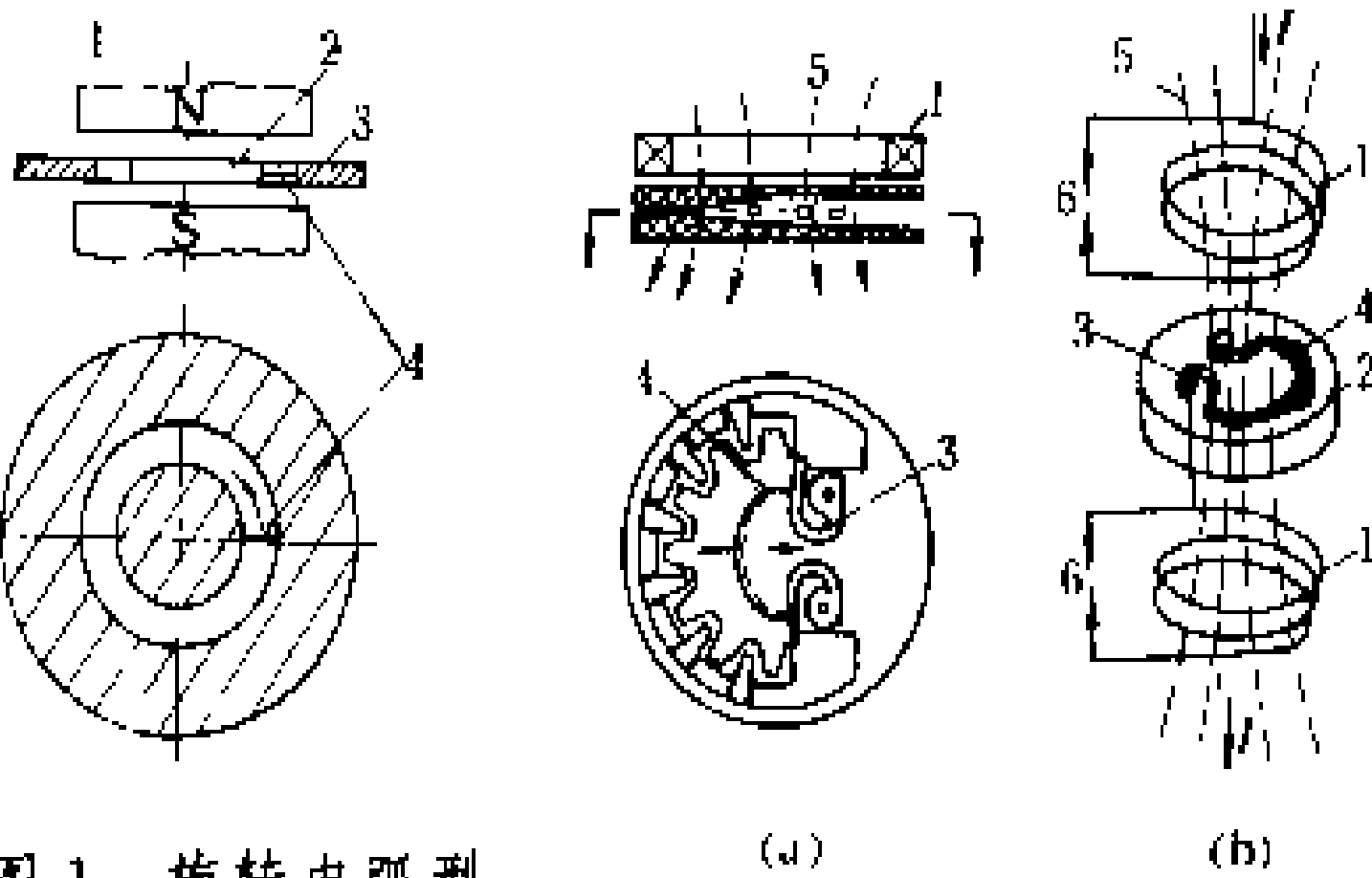


图1 旋转电弧型

磁吹间隙

1—磁铁；2—内电极；3—外电极；4—电弧(箭头代表电弧受力方向)

图2 拉长电弧型磁吹间隙

(a) 间隙构造；(b) 分流间隙

1—磁吹线圈；2—灭弧盒；3—电极；4—电弧；5—磁力线；6—分流间隙

场由永久磁铁产生，电弧在磁场的作用下沿圆形间隙旋转，使弧道冷却，加速了电流过零后弧隙介质强度的恢复，能切断300 A(幅值)左右的工频续流。拉长电弧型磁吹间隙的结构如图2所示。它的磁场由线圈产生，电弧在磁场的作用下被拉长并进入灭弧盒的狭缝内，受到冷却，产生强烈的去游离而熄灭。狭缝中的电弧有较高的电位梯度，电弧的压降还可起到限制工频

续流的作用,因此可减少部分阀片,使避雷器的雷电冲击残压得到相应的降低。为避免雷电流在磁吹间隙上形成的压降叠加到残压上,磁吹线圈要并联一个分流间隙[见图 2(b)]。当雷电流通过线圈形成压降时,分流间隙应放电将线圈短路;当工频续流通过时,分流间隙应自动熄弧使续流转入线圈,形成吹弧磁场。拉长电弧型磁吹间隙可熄灭高达 1000A (幅值)的续流。

磁吹避雷器于 20 世纪 50 年代问世, 在这一基础上, 60 年代又发展了复合避雷器, 目前已逐渐被金属氧化物避雷器所取代。

### 参考书目

机械工程手册 电机工程手册编辑委员会，电机工程手册，第28篇 避雷器，北京：机械工业出版社，1978

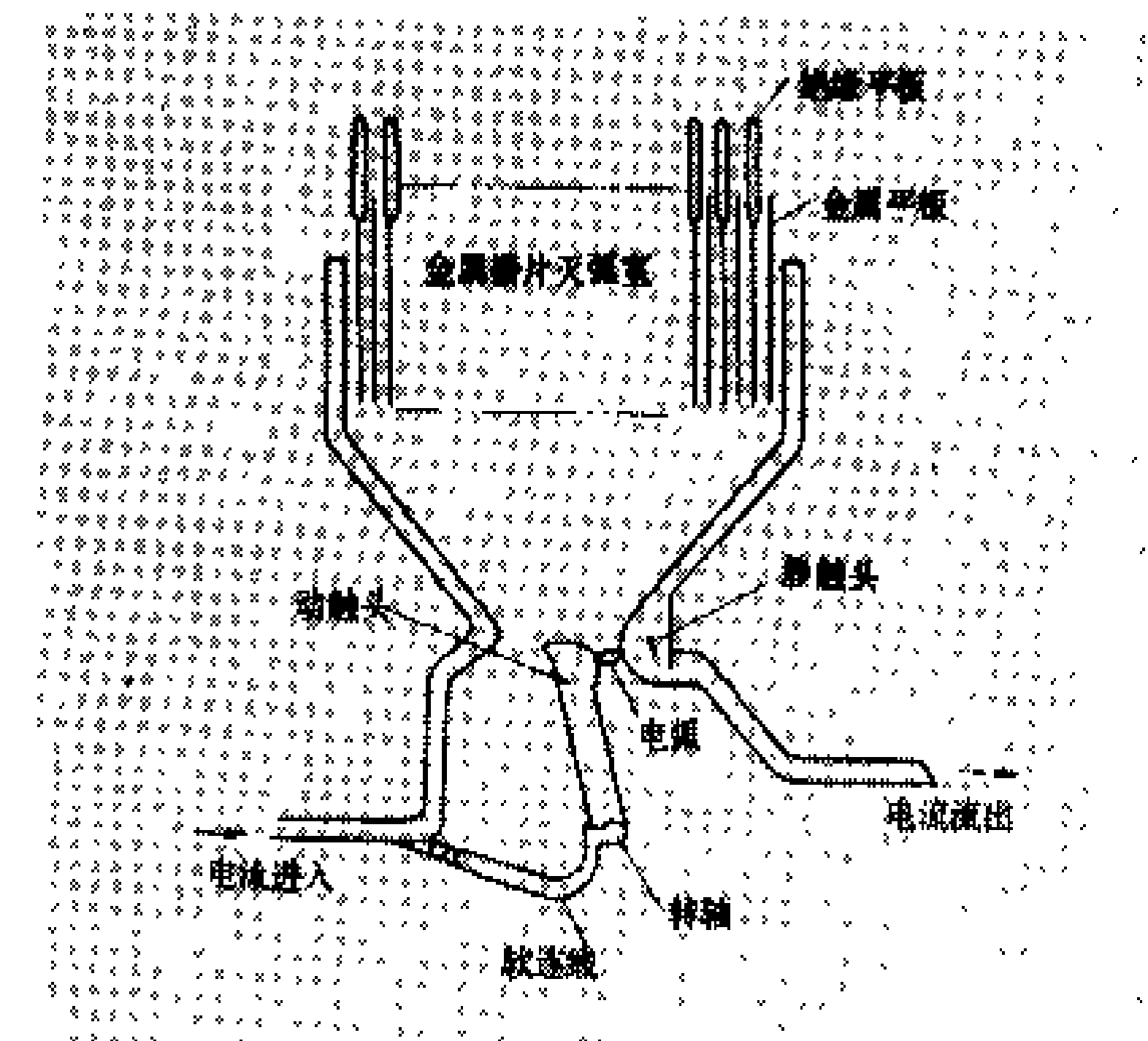
Шишман Д. В. Вентильные разрядники высокого напряжений. Энергии, 1978

(李君盛)

cichui duanluqi

**磁吹断路器** (magnetic blowout circuit breaker) 利用磁吹原理灭弧的断路器。利用磁场对弧柱的电磁力驱使电弧进入由一组栅片形成的灭弧室,由于电弧与栅片壁接触,加速了电弧的冷却,去游离作用加强,使电弧快速熄灭。按照栅片材质的不同,磁吹断路器一般分为金属栅片式和绝缘板栅片式两种。

金属栅片式磁吹断路器的结构原理如图所示，其栅片是金属导体，电弧在电磁力作用下进入一组栅片



### 金属栅片式磁吹断路器的结构原理图

后,被分割成若干短电弧,当电流过零后,每个短电弧隙上的介电强度可高达数百伏(由于阴极效应,介电强度可恢复到 200V)。在金属栅片中的炽热气体是金属蒸气和空气的混合物。据一般的规律,高电离电位、低沸

点材料栅片间隙的阴极效应,使得栅片间隙具有较高的介电强度。

绝缘栅片式磁吹断路器具有“之”字形迷宫式的窄缝，多用于 15 kV 及以下的系统中。中国华通开关厂制成以云母玻璃栅片组成的灭弧室，用于 35 kV 磁吹断路器上，其原理与金属栅片式相同。但因电压较高，为了加长电弧，并使动、静触头间的电弧能很快进入栅片组，采用了能形成强烈磁吹的几个线圈，它们在正常工作状态下并不接入线路，而是跨接在电弧路径中的几个区段上。当电弧向栅片内延伸时，这些磁吹线圈被依次接入主回路，电磁力迫使电弧进入栅片区，电弧被拉长，弧柱与绝缘栅片表面接触后，栅片受热释放出大量气体，电弧被冷却而熄灭（不是由于阴极效应）。

磁吹断路器通常难于开断电力电缆线路的短路故障。因为，电缆线路形成的恢复电压上升率较低，电弧在发展初期较易熄灭，此时电弧路径尚未发展到栅片区，只处在离触头不远的空间内。这一区域充满高温电离化蒸气，在高的恢复电压峰值到来时形成热击穿。电缆线路电容中储存的能量释放出来，使这种短路难于顺利开断。

磁吹断路器以其无油、无火灾危险,能适应频繁操作的优点而得到广泛应用。但是,它的开断能力和电压等级都不高,且价格较贵。在更高电压等级的系统中,其地位被空气断路器、六氟化硫断路器或真空断路器所取代。

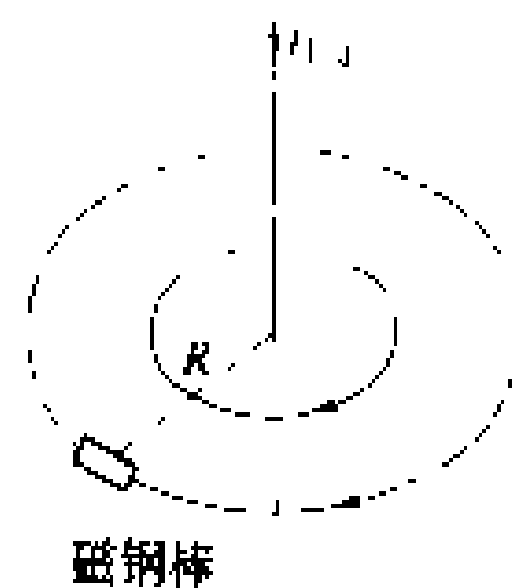
### 参考书目

李天和著. 大功率开关装置的物理基础与工程应用. 程礼椿等译. 北京: 电力工业出版社, 1982


(曹榮江)

cigangbang

**磁钢棒** (ferromagnetic bar) 利用剩磁测定雷电流幅值和极性的磁性材料棒。磁钢棒要采用不易饱和、矫顽磁力大和涡流损耗小的铁磁材料制作。常用的磁钢棒由阿尔尼合金粉(铝 15%，镍 24%，铜 4%，铁 57%) 与胶木粉压制面成。



用磁钢棒测量流经载流导体(例如避雷针、避雷线)的雷电流时,可将它放在载流导体的附近,如图所示。磁钢棒的一端涂以红色标记,安装时这一端指向统一规定的方向。当幅值为  $I_m$  的雷电流通过载流导体时,磁钢棒处的最大磁场强度  $H = I_m / 2\pi R$ , 式中  $R$  为磁钢棒和载流导体间的距离。雷电流流过之后,磁钢



The diagram illustrates the setup for measuring a lightning current using a magnetic steel rod. A central vertical line represents the current-carrying conductor. A dashed circle with radius  $R$  indicates the distance from the conductor to the magnetic steel rod. The rod is shown as a small rectangle with a red dot at one end, positioned tangentially to the dashed circle. A label '磁钢棒' (Magnetic steel rod) points to the rod.



棒上保持的剩磁  $B_r$  由磁钢棒处的最大磁场强度  $H$  和磁钢棒的磁化曲线决定。检测磁钢棒的剩磁即可推算出雷电流的幅值。检查磁钢棒红色端的极性即可决定雷电流的极性。磁钢棒红色端的极性可用指南针来检

查，造成磁钢棒剩磁的雷电流幅值可用正切检磁计法或交流退磁法来确定。磁钢棒的测量误差为  $\pm 10\% \sim \pm 20\%$ 。

(雷经煌)

# D

dadianliu duanluqi

**大电流断路器** (heavy current circuit breaker) 用于发电机、同步调相机、抽水蓄能电站的保护用断路器,也称为发电机断路器。大电流断路器还用在发电厂的厂用电分支回路以及制动回路中。它有三种类型:少油型、压缩空气型、六氟化硫型。少油型用于短路电流较小的回路;另两种的开断能力可以做得很大,可用作 300~1000-MW 机组的保护。大电流

断路器的结构有三相立式和单相卧式两种,立式的开断能力较小,卧式的开断能力较大,但都为三相联动。母线的连接有敞开式和封闭式两种:敞开式的开断能力较小,一般用在 12 kV 级;封闭式的开断能力大,一般用在 24~36 kV 级。

大电流断路器的特点是:①额定电流很大,达 20~50 kA;②额定短路开断电流很大,达 135~225 kA (不带直流分量)或 180~300 kA (带直流分量);③开断电流中的直流分量很大,且衰减缓慢,甚至在最初的 50~80 ms 内电流波形无过零点;④具有高恢复电压上升率,在 100%额定短路开断电流下的恢复电压上升率达 5~7 kV/ $\mu$ s,远远超过一般断路器的承受能力;⑤对散热系统的高要求,除风冷、强制风冷外,还增加了水冷品种;⑥在失步状态下的开断电流可能达到额定短路开断电流的 50%;⑦机械寿命试验次数多,一般要求达 5000 次以上;⑧动稳定试验电流约高于常规断路器的 10%;⑨其操作顺序不要求重合闸。

几种大电流断路器的技术参数如表所列。

大电流断路器的技术参数

序 号	产品类型及制造厂	额定电压(kV)	额定电流(A)	额定短路开断电流(kA)	国 别
1	少油式, SN3-10 型	10	2000 3000	29	中国
2	少油式, SN4-10 (G) 型	10	4000~6000	90~105	中国
3	SF <sub>6</sub> , 单压式, 日立, OFPT-20L-80PA	24	10000	80	日本
4	SF <sub>6</sub> , 单压式, 三菱, SFWA	24	8000~12500	110	日本
5	SF <sub>6</sub> , 灭弧式, BBC, HEK3	24	6700~12500	110	瑞士
6	空气式, BBC, DB20	17.5	10000	97	瑞士
7	空气式, BBC	38	40000	300	瑞士
8	SF <sub>6</sub> , 三菱	36	36000	150	日本
9	空气式, 阿尔斯通公司, PKG2 沈阳高压开关厂, KN4-36	36	11000, 14000, 18000, 22000, 25000	135~225	法国 中国

随着电力系统与发电机单机容量的与日俱增,大电流断路器的参数有继续上升的趋势:额定电压 22~26 kV,额定电流 15~60 kA,额定短路开断电流(对称) 150~500 kA,动稳定电流峰值 240~1200 kA,恢复电压的初始上升率 8~10 kV/ $\mu$ s,分闸时间 60~100 ms,热稳定时间 1~3 s,失步开断电流 50%,失步开断电压系数 2~3,并可能要增加分闸电阻和并联电容。

(曹荣江)

dagonglu shiyanzhan

**大功率实验站** (high power laboratory) 进行大功率试验的专用高电压、大功率设施,又称高电

压强电流实验站。它是用以研究开发高压开关设备特别是高压断路器的主要设施。大功率实验站,除了具备能提供直接试验能力达数千兆伏安短时三相功率的大功率电源外,同时还配备有相应的高电压实验设备,或者与高电压实验室相邻建设。

大功率实验站的类型有网络试验站、冲击同步发电机试验站和振荡回路试验站。它们都能单独运行,又可相互配合进行多种类型的试验。(见断路器试验)

1912 年,德国 AEG 公司建立了第一个冲击同步发电机试验站;1949 年,法国电力公司(EDF)建立了第一个网络试验站;1947 年,苏联在列宁格勒加里宁工程学院,(ЛПИ,1989 年改名为列宁格勒国立工业大学,ЛГУ)建立了第一个振荡回路试验站。至今各

国已先后建立近 50 座大功率实验站,中国有四座。其中,以荷兰电工器材试验有限公司的荷兰 KEMA 大功率实验站的功率最大,试验项目最全,是世界性的权威机构。中国最大的大功率实验站是 1964 年建成的西安高压电器研究所大功率实验站,由冲击同步发电机获得能源。依功率大小次序还有 1963 年建成的沈阳高压开关厂虎石台实验站,1979 年建成的中国电力科学研究院大功率实验站和 1957 年建成的上海华通开关厂实验站,这三座大功率实验站都属于网络试验站。

(顾克鸿)

dagonglü shiyan

**大功率试验** (high power tests) 用大功率电源考核高压开关设备开断与关合能力和某些高压电气设备承受高电压、大电流能力的试验的统称。包括开断能力试验和关合能力试验,短时耐受电流试验,峰值耐受电流试验,温升试验,突发短路试验等。高压开关设备是指断路器、隔离开关、高压熔断器、重合器、分段器、管式避雷器、电磁开关、负荷开关、高压接触器等,以及它们的组合体(如开关柜、箱式变电站、气体绝缘变电所)。某些高压电气设备指的是电抗器、阻波器、电力变压器、电流互感器等。

由于大功率电弧的物理过程复杂,在可预见的几十年内,尚不可能用单纯计算或数学物理模拟的办法考核高压开关设备的开断与关合能力,而只能在大功率实验站中进行考核。

**开断能力试验和关合能力试验** 用大功率试验电源在规定的使用条件和指定的电压下考核高压开关设备的开断与关合预期短路电流值的试验。国际电工委员会(IEC)规定,以断路器出线端的短路作为试验的基本条件,它包括四种典型方式,各方式的短路电流值依次为额定短路开断电流的 10%、30%、60%和 100%。这些电流中的直流分量均不大于 20%。对快速动作的断路器,要求电流中的直流分量按其动作时间的长短来确定。试验回路的功率因数为 0.15,直流分量衰减的时间常数为 45 ms。三相试验时的回路电压为断路器的额定电压,单相开断试验时的回路电压为三相系统中首先开断相的工频电压,单相关合试验时的回路电压则反映最后合闸相的工频电压升高。IEC 还规定了对应于上述四种方式中每一种方式的恢复电压特性(见大功率试验参数)。IEC 的专业规程中所说的额定电压是指在运行中的最高电压,它比中国标准中规定的额定电压高 5%~15%。

**短时耐受电流试验** 高压开关设备经受额定短路开断电流短时作用的热效应试验,又称热稳定试验。这里的短路开断电流值仅指开断电流中的交流分量有效

值,指定的作用时间称为短时耐受电流作用时间额定值,通常为 1~4 s,IEC 的规定值为 1 s 或 3 s。

**峰值耐受电流试验** 高压开关设备经受带有 100% 直流分量的额定短路开断电流的电动力效应试验,又称动稳定试验。IEC 规定的这一电流峰值为额定短路开断电流值乘以 2.5。动稳定电流的通流时间不小于 0.3 s。对不接地的三相设备进行动稳定试验时,只有当任一个“边相”上出现了预期峰值电流始为有效。

以冲击同步发电机为试验电源时,峰值耐受电流试验和短时耐受电流试验通常是同时进行的。其他情况下,需采用专用变压器作为电源。

**温升试验** 高压开关设备通流回路受额定电流长期作用会引起温度升高。做温升试验时,对被试品在常温下施加额定电流,当电流值保持不变,被试品的温度在 3 h 内的变化不超过 2 K,即可认为其温升已达稳定状态。温升数值指被试品的温度超过周围空气温度的数值。在试验中,温升不应超过材质所允许的最高限度,但对于已经受过短路电流的开断与关合后的触头部位,其温升标准允许超过规定的上限值 10 K。温升试验应采用大电流变压器作为电源。

按照中国标准的规定,对高压开关设备进行连续机械操作试验(即机械寿命试验)的前、后应各进行一次温升试验,以判断连续机械操作试验是否引起了设备损伤。

通流回路的直流电阻能反映主回路各接触点的状态,对该电阻的测量在温升试验前、后各进行一次,测量时采用通以 100 A 以上电流的压降法。接触点经受温升试验后的直流电阻允许比温升试验前有所增加,但增加值不得超过原数值的 20%。在高压开关设备的连续机械操作试验前、后也各测一次直流电阻。一般的规律是,连续机械操作试验后的直流电阻比试验前的值要小一些。

**突发短路试验** 对二次绕组处于短路状态(三相的或单相的)的电力变压器突然施加电压,通过变压器的电流可达其额定电流的若干倍(例如 25 倍),以对电力变压器形成电动力考验。三相电力变压器应进行三次能控制合闸相位的通流试验,使三相绕组中都能出现一次最大的电流峰值。一般地,希望短路电流能达到变压器额定电流的 25 倍,但作用电压不得超过最高电压。由于电力变压器的铁芯在突发短路时处于磁饱和状态,而各种结构、尺寸和材质的铁芯的饱和特性各不相同,因而难于精确估计铁芯绕组的饱和电抗,这给试验中如何确定附加的用以调节电流的电抗值带来困难,常有必要增加试验次数。

**试验方法** 见大功率试验方法。

**试验设备** 见大功率实验站、网络试验站、冲击同

步发电机试验站、振荡回路试验站。

### 参考书目

IEC Publication 56. High - Voltage Alternating - Current Circuit - Breakers, 1987

(曹荣江)

dagongli shiyan canshu

## 大功率试验参数 (parameters for high power test)

按技术标准规定的试验条件确定的用以表征高压开关设备工作能力的一组特性数据。主要有额定短路开断电流、出线端故障的额定瞬态恢复电压、峰值耐受电流、短时耐受电流及其持续时间额定值等。

**额定短路开断电流** 在标准规定的使用和性能条件下,在规定的瞬态恢复电压特性下,开关设备能开断的最大短路电流有效值。这一电流系列的数值在国际上常通用 R10 系列(参见中国国家标准 GB321《优先数和优先数系》)。额定短路开断电流由交流分量有效值和直流分量合成,如果直流分量不超过 20%,则略去不计。

**出线端故障的额定瞬态恢复电压** 当发生在断路器出线端的短路电流过零后,出现在断路器断口间的瞬态恢复电压 (TRV) 规定值,是断路器的重要特性参数。短路电流的大小与电源回路的构成有关,因此,不同的短路电流所对应的瞬态恢复电压波形及其特性参数各不一致,这些参数是其他参数的基础。它们是:波形(只有一个波峰,还是有两个波峰,还是其他更为复杂的波形),波的幅值(第一波幅值,第二波幅值),到达波幅值的时刻,初始上升陡度——上升率,幅值系数,首开相系数,延迟线等。

**开断电流的分级** 国际电工委员会 (IEC) 的标准规定,按照开断电流为额定短路开断电流的百分数,开断电流分为四级,即开断电流为额定短路开断电流的 10%、30%、60% 和 100%,分别称为方式 1、2、3 和 4。在四种方式中,电流中的直流分量均不超过 20%,只计其中的交流分量。对快速动作的断路器尚应进行带有直流分量的开断试验,即试验方式 5,其试验电流为额定短路开断电流,其中的直流分量大于 20%。IEC 给出了对应于这些方式所要求的 TRV 标准参数,分别用两参数法和四参数法表示。

**两参数法恢复电压** 当 TRV 可用一单频振荡波表示时,如图 1 所示,通过 TRV 幅值  $U_m$  的水平线与由原点所作波形的切线交于 A 点。由 A 点的时标  $t_m$  和 TRV 幅值  $U_m$  为代表的两个直线段 OAA' 形成 TRV 的包络线,以表征这一恢复电压波,它代表主要由一个

四参数法恢复电压 当系统短路电流既来自就近

的发电厂,又来自远方电力系统和地区电力系统时,TRV 呈现为较复杂的多频波,一般以图 2 所示的波形为其代表,它具有两个典型的波峰。由第一峰值  $U_1$ 、

第二峰值  $U_2$  以及到达这两个峰值的时间  $t_1$

和  $t_2$  四个参量形成的三线段包络线 OBCC' 来表征这一恢复电压,称之为四参数法。OB 段是由原点对第一

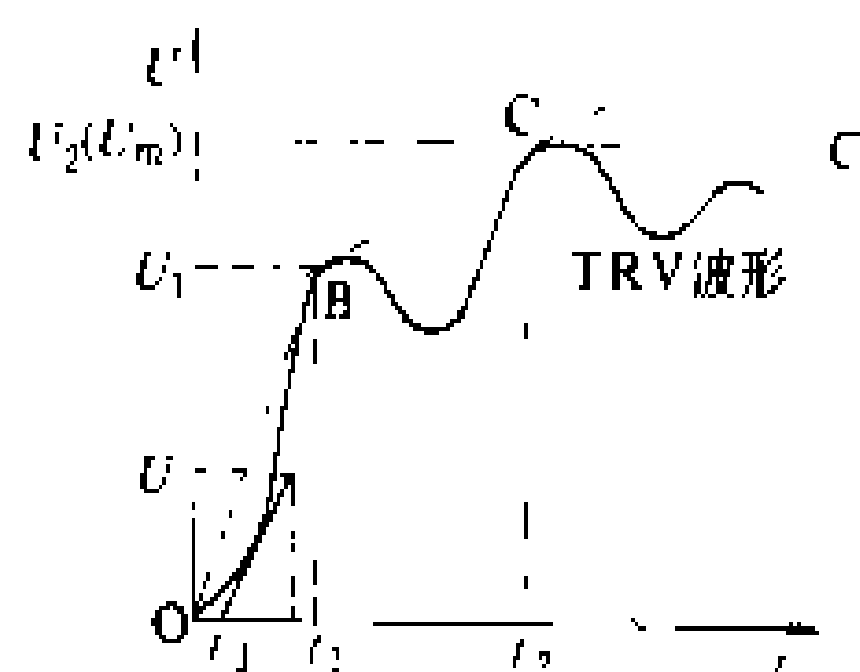


图 2 TRV 波形的四参数表示法

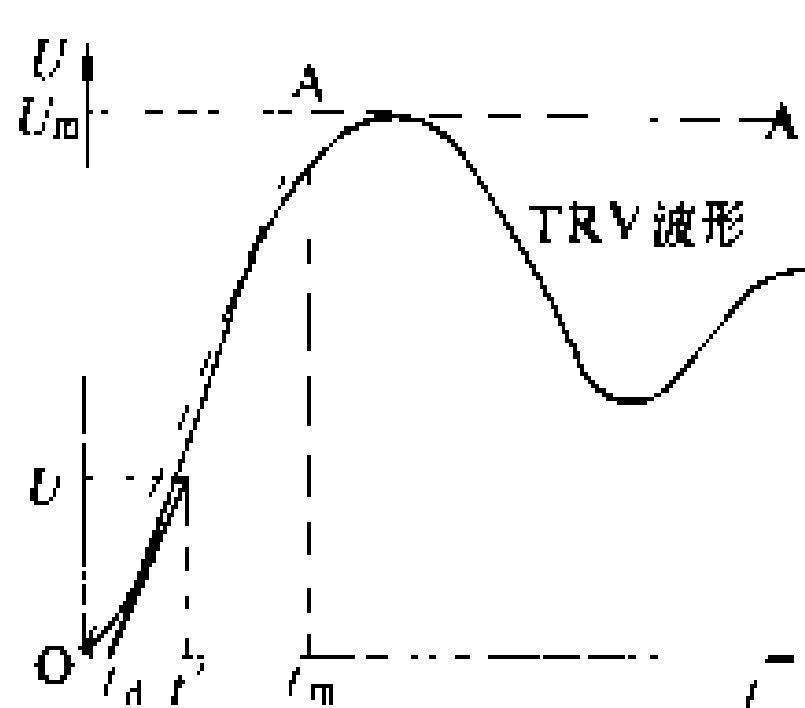


图 1 TRV 波形的两参数表示法

波峰所作的切线,BC 段是两个波峰的公共切线,CC' 段是通过幅值的水平线段。

**振幅系数** TRV 波形幅值与其工频分量幅值之比,它表示系统的振荡和衰减特性。振幅系数决定着

TRV 的幅值,从而影响灭弧的难易程度。

**TRV 上升率** 表征瞬态恢复电压在开断电流过零后的上升陡度。断路器能否熄灭电弧就以灭弧间隙中的介电强度恢复过程是否能克服这一电压上升陡度而决定。IEC 规定在 110 kV 及以上电力系统中的 TRV 上升率(在额定短路开断电流下)均为  $2 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 。

**首开相系数** 表征三相断路器在开断三相短路过程中首先灭弧相上 TRV 工频分量幅值对额定相电压幅值的升高系数。由于经济上的原因,在实际试验中不具备三相试验条件时,经常采用单相试验来代替三相试验。由于三相电流不同时过零,首先过零灭弧相上的 TRV 工频分量高于额定相电压幅值,其升高系数为系统两相短路时在断路器处的完好相对另两相的工频电压与短路消除后同一处的相电压之比。在有效接地系统中,该系数接近 1.3;在非有效接地系统中,其值为 1.5(当系统中的正序阻抗与负序阻抗相同,且均为零序阻抗值的  $1/3$  时)。

**延迟线** 图 1、2 中在坐标原点附近作一平行于 OA 或 OB 的切线,该线与时间轴交于  $t_d$ ,这条以  $t_d$  为起点的斜线称之为延迟线,它表示对实验室中产生的 TRV 波形的上升情况规定的限制条件。IEC 规定,电压波在上升过程中与延迟线的交点不得多于一点,使实验室中产生的 TRV 波形具有一定的初始上升陡度,以保证试验条件的等价性。

**峰值耐受电流** 表征高压开关设备对大功率电动

力承受能力的参数,又称动稳定电流。它是在规定使用和性能条件下,回路或开关设备在合闸位置时能承受的电流峰值,其值是额定短路开断电流的 2.5 倍。

**短时耐受电流** 表征高压开关设备对大功率发热承受能力的参数,又称热稳定电流。它是在规定使用和性能条件下,在规定的短时间(热稳定电流的作用时间)内,回路和开关设备在合闸位置时能承载的电流的有效值。

参考书目

曹荣江, 交流高压断路器的运行条件, 北京: 水利电力出版社, 1985

(曹荣江)

dagonglu shiyan fangfa

**大功率试验方法** (high power testing methods) 由于获得大功率电源的投资太大,不得不根据开断与关合大功率过程的特性,寻求既能节约投资又能保证试验等价性的代用方法。根据产生大功率的方式不同,大功率试验分为直接试验法和合成试验法,根据被试品所需的试验功率和实验室的能力确定选用直接试验还是合成试验。被试品可以是三相整体、单相、单相的部分断口或一个断口。

**直接试验法** 外加的电压、电流、瞬态和工频恢复电压(见大功率试验参数)均取自一个单独回路(电源)。若电源全部取自冲击同步发电机则称为冲击同步发电机回路试验,若全部取自电力系统则称为网络试验,若全部取自电容器和电抗器构成的回路则称为振荡回路试验。

**合成试验法** 大部分或全部工频电流取自一个电源(工频电流回路),瞬态恢复电压的大部分或全部取自另一个或几个电源(电压回路)。供给工频电流的电源是电流源,供给恢复电压的电源是电压源。电流源的电压一般仅为电压源电压的几分之一,而电压源的电压则与被试断路器的额定电压相当。按电压回路投入工作与电流过零的关系,合成试验法又分为电流引入法和电压引入法两大类。采用合成试验法可以扩大直接试验的容量:对油断路器为 3~4 倍,对空气断路器为 4~6 倍,对六氟化硫断路器约为 10 倍。

合成试验技术和回路结构仍有许多问题有待研究。在基本理论方面要研究电弧零区现象、断路器和网络的相互作用、恢复电压波形标准和模拟方法、回路元件及参数以及它和试品之间的相互影响、合成试验的等价性等问题。在合成试验技术方面要研究开发带低值并联电阻断路器的合成试验、油断路器的合成试验、低恢复电压频率的特高压断路器的合成试验、合成关合试验、开合电容性电流的合成试验等技术。在合成回

路的结构方面要研究设计多级串联合成回路以试验特高压断路器,研究设计二次过零加电压合成回路等。在控制和测量方面要研究如何应用电子、激光和光纤技术。

**电流引入法合成回路** 电压回路在电流过零点前引入被试断路器的合成回路,它又分为并联电流引入(电压回路与被试断路器并联,如魏尔合成回路)和串联电流引入(电压回路与辅助断路器并联,如卡普兰双频回路)两类。

(1) 魏尔合成回路。一种并联电流引入的合成回路,由德国 AEG 公司魏尔(Weil)工程师提出,1950 年开始运用。由于它的参数调整灵活,等价性好,广为采用,运行经验最多。中国也沿用此法。魏尔合成回路特别适用于空气断路器和六氟化硫断路器及其他低电弧压降的被试品,包括近区故障试验。国际电工委员会 IEC427 出版物《高压交流断路器合成试验标准》中,也将魏尔合成回路推荐为标准试验回路,并得到公认,它与直接试验等价,是型式试验的主要手段。魏尔合成回路的基本工作原理是在开断过程的相互作用阶段中,电压回路向被试断路器提供引入电流,为满足等价性的要求,电压回路的频率为电流回路频率的 3~10 倍,其回路原理接线如图 1 所示。

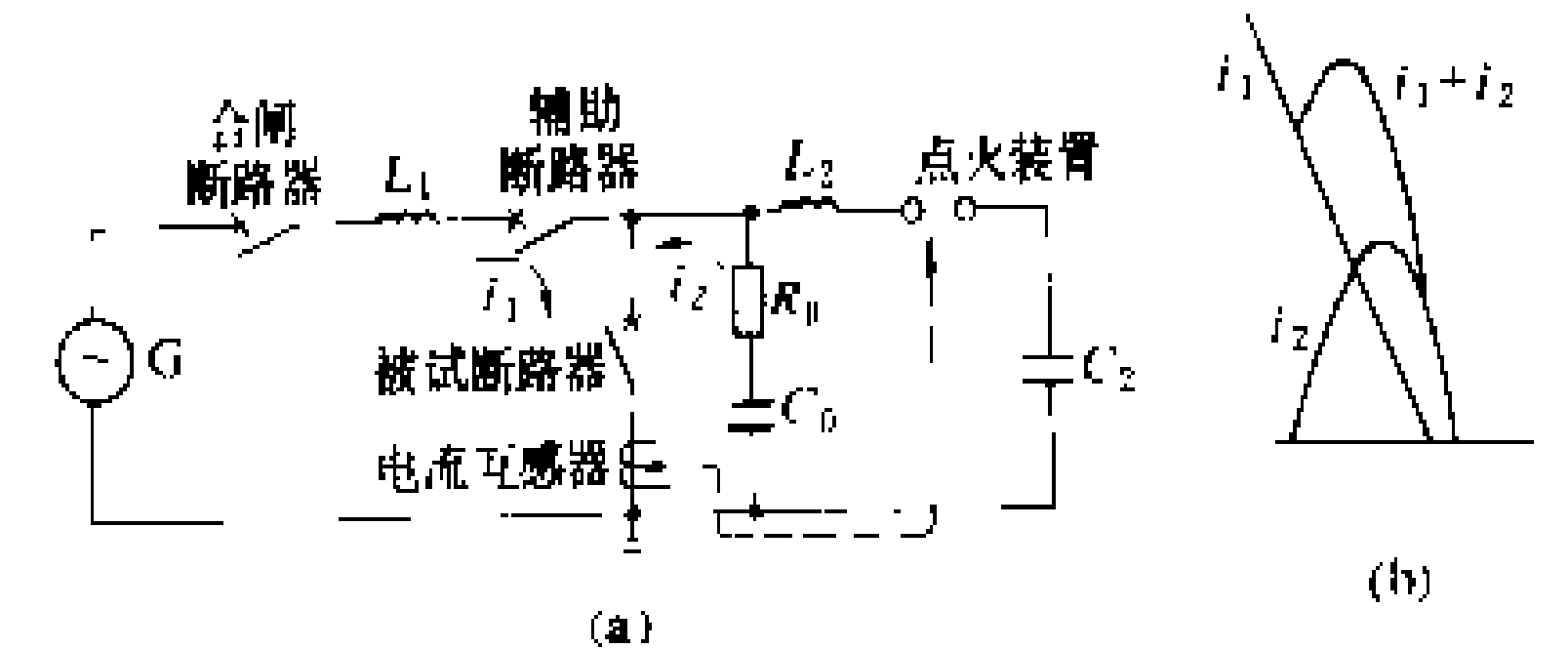


图 1 魏尔合成回路原理接线图  
(a) 原理接线; (b) 电流波形

当合闸断路器合上后,被试断路器中电流( $i_1$ )过零前约几百微秒的瞬间,通过点火装置引入电压回路,其电流( $i_2$ )叠加在工频电流( $i_1$ )上。由于辅助断路器与被试断路器同时分闸,辅助断路器中的电流( $i_1$ )先于被试断路器中的电流( $i_1+i_2$ )过零,辅助断路器中电流先熄弧,将电流源切除并隔离。当被试断路器中电流( $i_2$ )过零后熄弧,即处于电压源回路中,施加瞬态恢复电压。被试断路器中电流波形的特点是有两个曲折点,该回路的等价条件是  $\frac{di_1}{dt} \int_{t=0} = \frac{di_2}{dt} \int_{t=0}$ ,即电流回路电流过零斜率与电压回路电流过零斜率相等。G 为电流源,电感  $L_1$  用来调节  $i_1$ ,  $C_2$ 、 $L_2$  分别为电压源电容和电感,决定电压回路频率和工频恢复电压值,  $R_0$ 、 $C_0$  用来调节瞬态恢复电压频率及振幅系数(两参数法)。由于电流回路和电压回路参数是各自独立的,



该回路的参数计算、选择较容易，试验成功率高，等价性好。

(2)卡普兰双频回路。一种串联电流引入的合成回路，由苏联电器工厂的卡普兰工程师提出。对于恢复电压频率较低的特高压断路器进行合成试验的等价性而言，卡普兰双频回路优于魏尔合成回路。但因卡普兰双频回路中电流回路与电压回路参数互相影响，使得回路参数的选择和调整比魏尔合成回路复杂。20 世纪 80 年代，苏联也采用了魏尔合成回路。卡普兰双频回路中电压回路的频率为电流回路频率的 3~5 倍，其回路原理接线如图 2 所示。

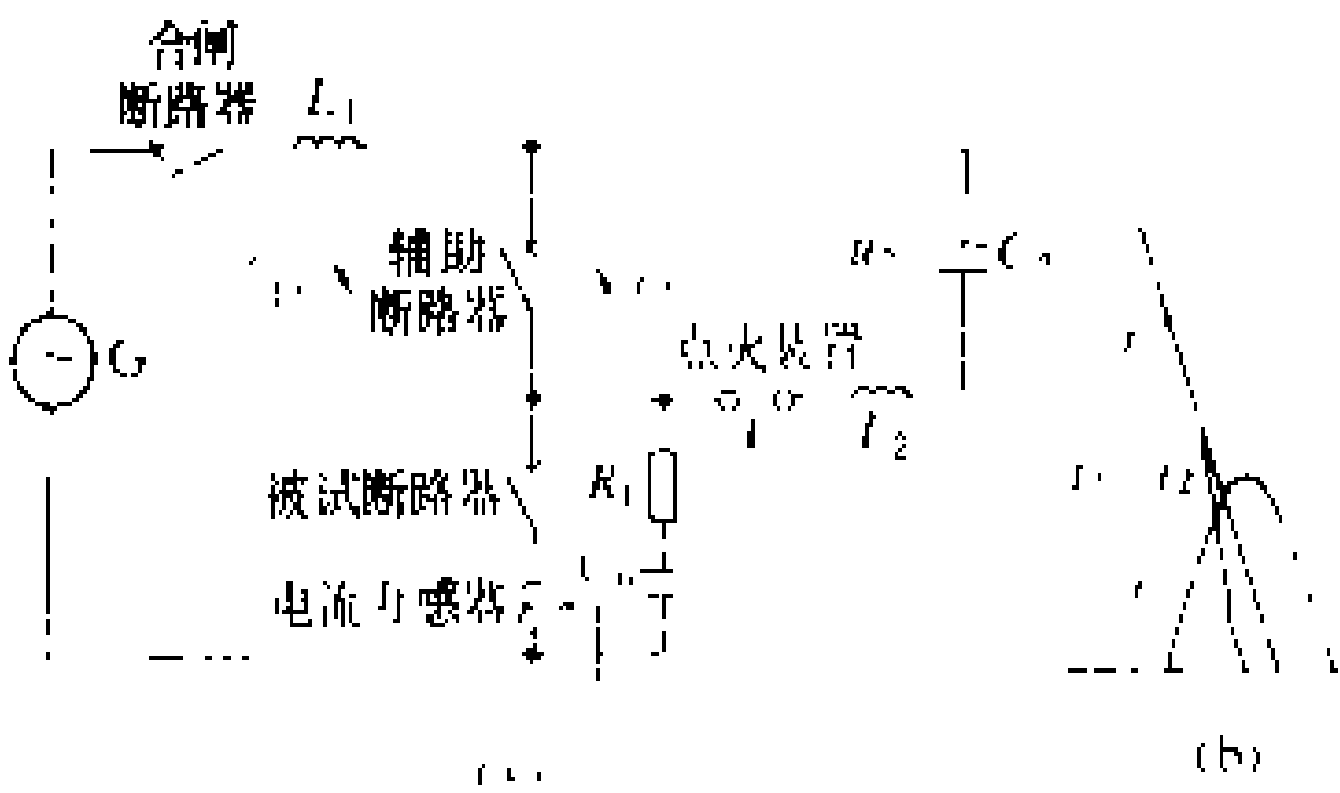


图 2 卡普兰双频回路原理接线图  
(a) 原理接线；(b) 电流波形

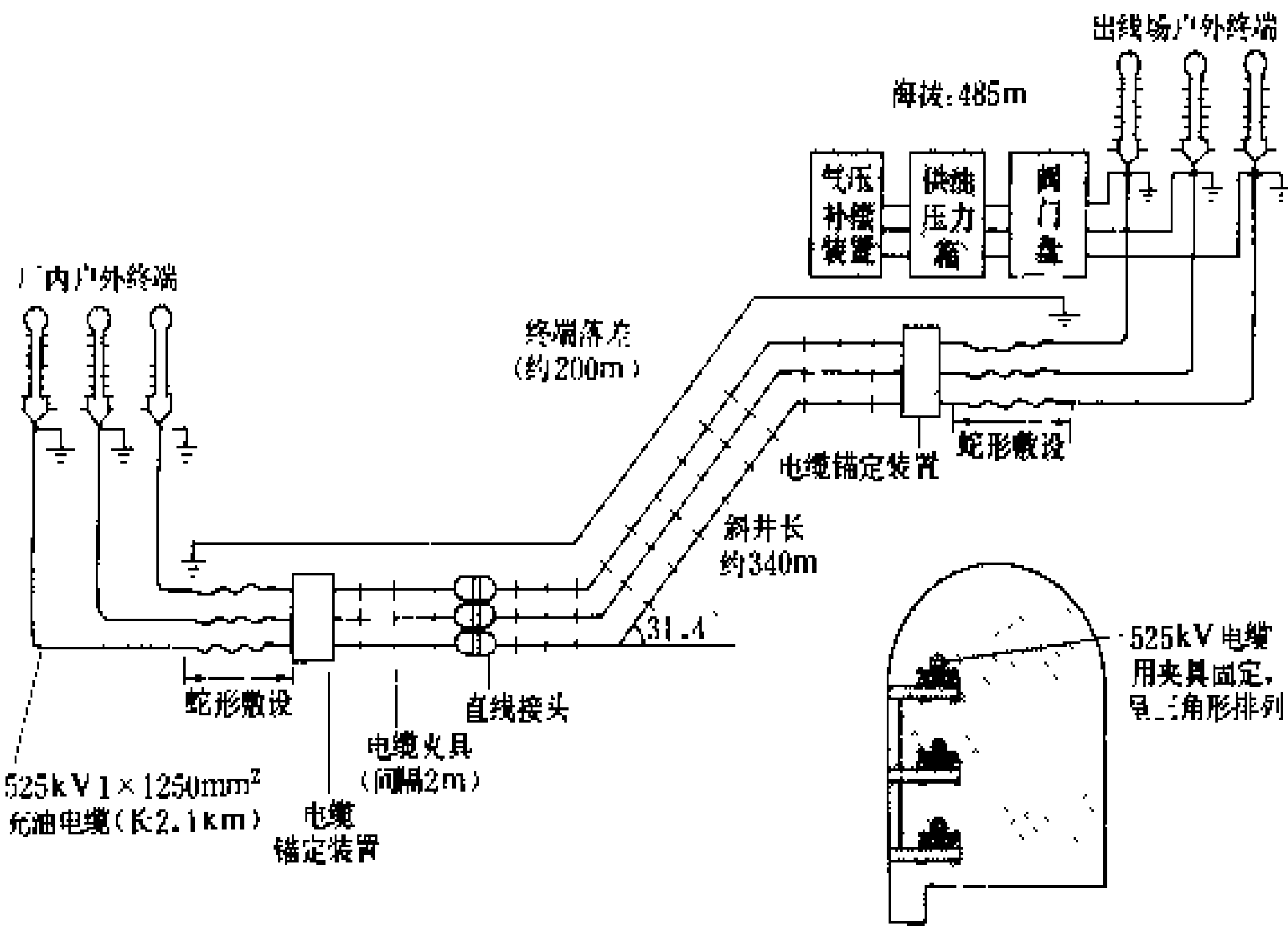
当合闸断路器合上后，在辅助断路器和被试断路器中流过工频电流  $i_1$ ，在  $i_1$  过零前几百微秒的瞬间，通过点火装置引入电压回路，电流  $i_2$  与辅助断路器中的电流  $i_1$  叠加，使辅助断路器中电流的灭弧瞬间超前于被试断路器中电流过零瞬间，从而使被试断路器承受的瞬态恢复电压处于电压源和电流源相串联的回路中，该恢复电压值为  $u_2 + u_1$ 。电流波形的特点是有一个曲折点，如电流  $i_1$  与  $i_2$  相交在  $i_2$  过零前  $30^\circ$  时，电流曲折率不超过 13%，这一点是该回路维持其等价性的重要条件。卡普兰双频回路的试验控制及测量等要求与魏尔合成回路相同。

电压引入法合成回路 电压回路在电流过零点后引入被试断路器的合成回路，它又分为并联电压引入（电压回路与被试断路器并联）和串联电压引入（电压回路与辅助断路器并联）两类。

(顾宪鸿)

Daguli 525kV dianlan gongcheng

大古力 525kV 电缆工程 (Grand Coulee 525kV cable project) 美国内务部开发局 (United States Department of the Interior Bureau of



大古力第三水电厂 525kV 充油电缆系统图

Reclamation, USBR) 在 1974 年 9 月向住友电缆公司订制了 525 kV 充油电缆，敷设在大古力第三水电厂的大坝隧道内。电缆线路的长度是 1950 m，终端间高落差为 185 m，共有三个回路。电缆线路的纵剖面如图所示。为了使电缆的金属护套能承受高油压，选用了 6.1 mm 厚的波纹铝套。为减少接头的数量，单盘的电缆长度为 1200 m。电缆盘是特殊设计的，宽度为 6 m，直径为 4.4 m，重达 60t。隧道中的电缆用刚性夹具固定，在终端附近的电缆为减少铝套中的热膨胀应力，采用蛇形敷设。该工程于 1977 年 11 月竣工，是当时世界上电压等级最高的最长的充油电缆线路。

(李拾芬)

daibiao dangju

代表档距 (ruling span) 见架空线力学计算。

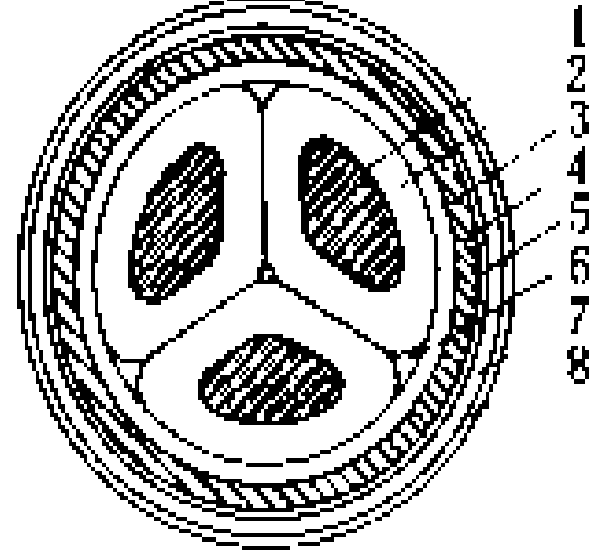
daijueyuan dianlan

带绝缘电缆 (belted type cable) 将多根纸绝缘线芯绞合成缆时用麻或纸填充成圆形，再在圆形绞合线芯外包绕纸绝缘层，然后干燥浸油再挤压金属套（铅套或铝套）的油浸纸绝缘电缆，又称统包型电缆。包在每一线芯上的绝缘层称为相绝缘层或芯绝缘层，包在绞合绝缘线芯外的绝缘层称为带绝缘层或统包绝缘层。相绝缘层厚度为适应线电压所需的一半厚度，带绝缘层的厚度为补足相电压所需的绝缘厚度。

典型的带绝缘电缆截面结构如图所示。为减小电缆外形尺寸，节省材料，降低电缆成本，带绝缘电缆的线芯一般都不采用圆形结构，而采用半圆形、扇形或椭圆形结构。双芯电缆除小截面采用圆形外，一般采用半圆形结构。三芯电缆除导线线芯截面积在  $25\text{mm}^2$  以下



用圆形结构外,一般采用扇形或椭圆形结构。四芯电缆其基本导电线芯为扇形结构,当基本导电线芯截面积在  $16\text{ mm}^2$  及以下时,其第四线芯(中性线芯)用圆形结构;基本导电线芯截面积在  $25\text{ mm}^2$  及以上时,第四线芯为扇形结构。第四线芯的导体截面积比基本线芯的导体截面积小一到两级。有些国家也有用带绝缘电缆的铝套兼作第四线芯的。



带绝缘电缆截面结构

1—导线; 2—相绝缘; 3—带绝缘; 4—金属套; 5—内衬层; 6—填料; 7—铠装; 8—外被层

带绝缘电缆已被逐渐淘汰。

**参考书目**

刘子玉, 电气绝缘结构设计原理, 北京: 机械工业出版社, 1981

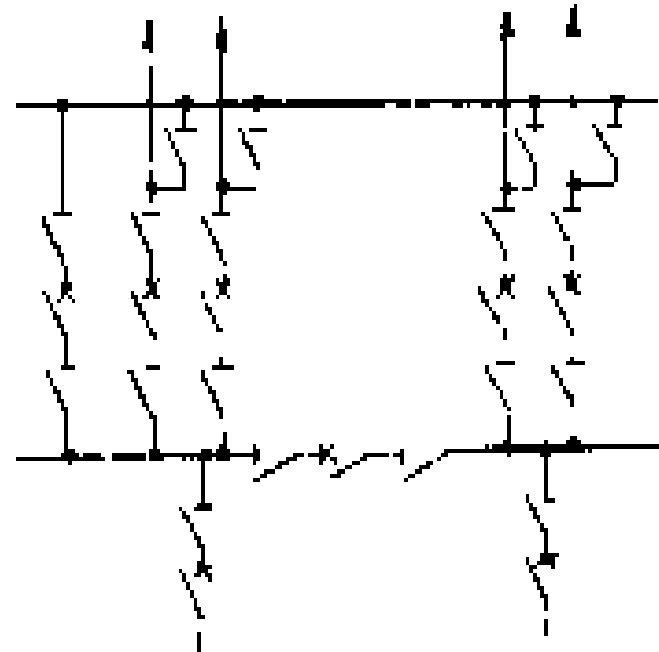
Barnes C C. Power Cables; Their Design and Installation. London: Chapman & Hall Ltd, 1953

(桑纪明)

danmuxian fenduan dai panglu muxian jiejian  
**单母线分段带旁路母线接线** (sectionalized single-bus with auxiliary bus configuration)

由一组分段的主母线和一组旁路母线组成的电气主接线。为了避免单母线分段接线中线路或主变压器回路的断路器检修时,引起线路或主变压器回路停电的缺点,设置了一组旁路母线(见图)。当线路或主变压器回路的断路器检修时,该回路可以通过旁路隔离开关接至旁路母线,再通过旁路断路器接至主母线,使该回路继续正常运行。

旁路断路器通常只有一种设置方式,即将一段主母线和一组旁路母线连接起来。由于只设一个旁路断路器回路,而且它与主母线和旁路母线之间是固定连接,因此不与旁路断路器回路连接的主母线上,其相应的



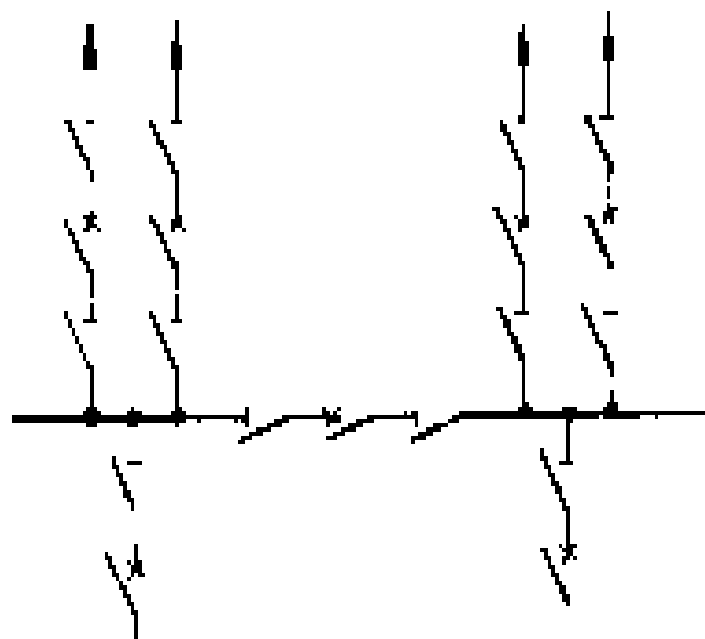
单母线分段带旁路母线接线

线路或主变压器回路中断路器停电检修时,该回路通过旁路回路接入另一段主母线上,能保证继续供电,但是改变了主母线上线路或主变压器的固定分配方式。在中国  $35\sim 110\text{ kV}$  的变电所中采用这种接线的较多。

(蓝增斌)

danmuxian fenduan jiejian  
**单母线分段接线** (sectionalized single-bus configuration)

装设分段断路器将单母线接线中的母线分成两段,将变压器和线路分别接到两段母线上的电气主接线。在这种接线方式中(见图),当一段母线上发生故障,母线隔离开关发生故障、或线路断路器拒绝动作时,分段断路器将自动断开故障母线段,或断开连接有拒绝动作断路器的母线段,使无故障母线段能继续运行。此外,还可以在不影响一段母线正常运行的情况下,对另一段母线或其母线隔离开关进行停电检修。

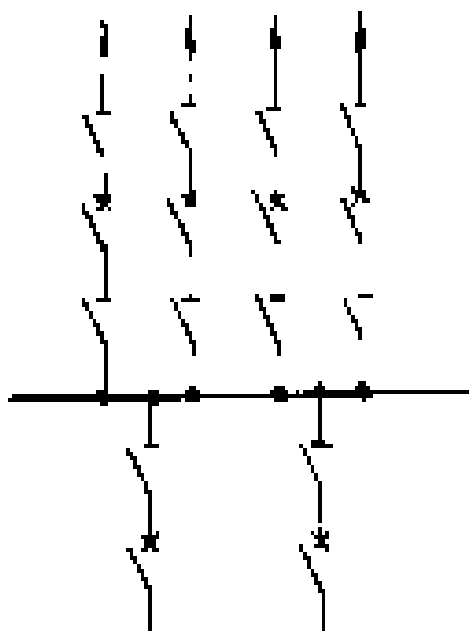


单母线分段接线具有与单母线接线相同的简单、方便和占地少的优点,而且提高了供电的可靠性。除了发生分段断路器故障外,其他设备发生故障时都不会使整个配电装置停电。对于重要负荷,有时从两段母线上分别引出线路向该负荷供电。单母线分段接线的缺点是:当一段母线或一组母线隔离开关发生永久性故障并需要较长时间进行检修时,则连接在该段母线上的线路或该段母线将较长时间地停电。因此,这种接线多用于电压较低、线路较少、装设有两台变压器、重要负荷由两回线路供电的变电所。

(刘元皋)

danmuxian jiejian  
**单母线接线** (single-bus configuration)

由线路、变压器回路和一组母线所组成的电气主接线。单母线接线只采用一组不带分段断路器的母线,每一回路都通过一台断路器和一组母线隔离开关接到这组母线上(见图)。这种接线方式的优点是简单清晰,设备较少,操作方便和占地少。但因为所有线路和变压器回路都接在一组母线上,所以当母线或母线隔离开关进行检修或发生故障,或继电保护装置动作而断路器拒绝动作时,都会使整个配电装置停止运行,运行可靠性不



单母线接线

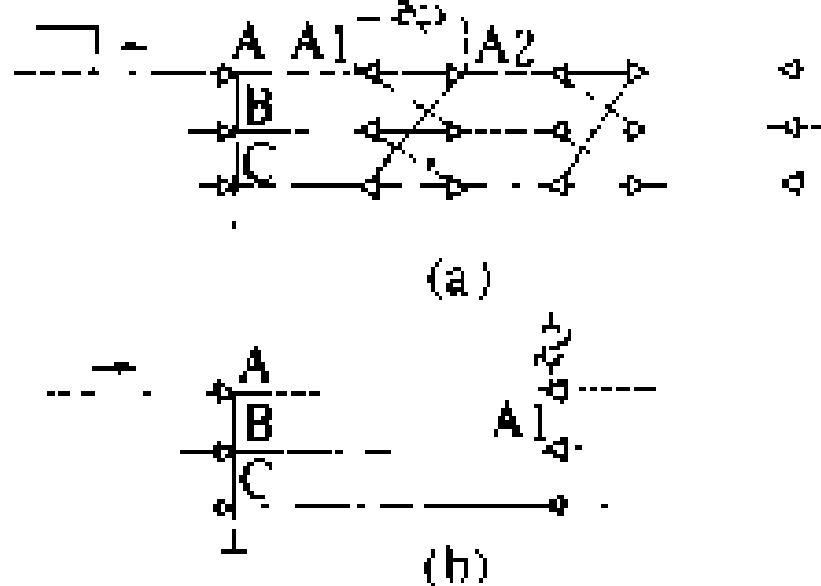
高。为了提高单母线接线的可靠性,有时在母线中间增设一组分段隔离开关,将母线分成两段,正常运行时,将分段隔离开关合上,线路和变压器分别接到两段母线上。这样,当一段母线或母线隔离开关进行检修或发生故障,或继电保护装置动作而断路器拒绝动作时,整个配电装置虽然停止运行,但当断开分段隔离开关后,无故障或无需检修母线段上的线路和变压器即可恢复供电。单母线接线只适用于电压较低、容量小和线路少的变电所。

(刘元皋)

danxin dianlan huceng guodianya baohu  
**单芯电缆护层过电压保护** (protection of sheath overvoltages in single core cables)

为保证单芯电缆安全运行防止雷害损坏护层的技术措施。从安全出发,高压单芯电缆的铅包是必须接地的。但如果将它的两端都接地,则芯线工频负载电流所产生的磁场会在铅包中感应出很大的电流,这不仅在铅包中形成热损耗,还会加速电缆绝缘的老化,并使电缆芯线的载流量降低 40% 左右。为了避免铅包中过大的感应电流,单芯电缆的铅包除了要设置绝缘的外护层外,还应配合以合理的铅包接地方式。常用的是铅包交叉互联后两端接地的方式,即把每相铅包断开成三等分,再将相邻两端的铅包交叉互联,如图 (a) 所示。在电缆长度较短时也有采用铅包一点接地的,如图 (b) 所示。

在图示的接线中,当冲击波沿某相(例如 A 相)芯线袭来,到达交叉互联中铅包的断联点 [图 (a) 中的 A1 点] 或铅包不接地的末端 [图 (b) 中的 A1 点] 时,芯线的冲击电流将不



单芯电缆的护层过电压保护  
(a) 铅包交叉互联;  
(b) 铅包一点接地

能再以铅包为回路流通,从而在铅包的绝缘外护层上形成单芯电缆护层的冲击过电压。如果不采取保护措施,护层必将在冲击过电压作用下损坏。为限制铅包不接地末端 A1 点的冲击过电压,应在 A1 点和地之间装设金属氧化物避雷器(也称电缆护层保护器),如图 (b) 中的虚线所示。为限制交叉互联时铅包断联处 A1 点的冲击过电压,国际上传统的做法是将电缆护层保护器接在 A1 点和地间,三相保护器组成 Y<sub>0</sub> 接法。1976 年中国提出了用跨接在断联铅包两端 [图 (a) 中 A1、A2 点间] 的保护器来限制护层过电压的方法,即将三相保护器组成 Δ 接法,如图 (a) 中的虚线所示,这

样可使护层所受的冲击过电压比国际上通用的 Y<sub>0</sub> 接法降低到 1/3 左右,而且大大简化了设计公式。Δ 接法的护层保护器也可用等值的 Y 接法的保护器取代。Y 接法时每个保护器所用的阀片可比 Δ 接法时减少 50%。通过保护器的雷电冲击电流一般在 10~20 kA 的范围内。保护器在通过冲击电流时不应损坏。保护器通过冲击电流时的残压应能和绝缘护层的绝缘水平相配合。

当系统出现故障,单芯电缆的芯线中流过系统的三相、两相或单相短路电流时,在护层绝缘上会有工频过电压出现。工频过电压以单相短路接地时最大,其持续时间取决于短路故障的时间。电缆愈长或流过芯线的短路电流愈大,工频过电压将愈高。工频过电压一般不会直接危及护层的绝缘,但会使护层保护器中流过持续时间较长(数秒)的工频电流,危及护层保护器。增加保护器所用的阀片数,可以减小工频过电压作用下流过保护器的工频电流,避免保护器损坏。但阀片多了,保护器的残压会增高,从而降低了保护器限制冲击过电压的能力。因此工频过电压会影响到护层所受的冲击过电压。单芯电缆采用交叉互联接线时,由于电缆的铅包能为芯线的单相接地短路电流提供回流的通路,其护层工频过电压要比铅包一点接地时低。交叉互联接线中作用在 Δ 接法的保护器上的工频过电压,要比作用在 Y<sub>0</sub> 接法的保护器上的低。

**参考书目**

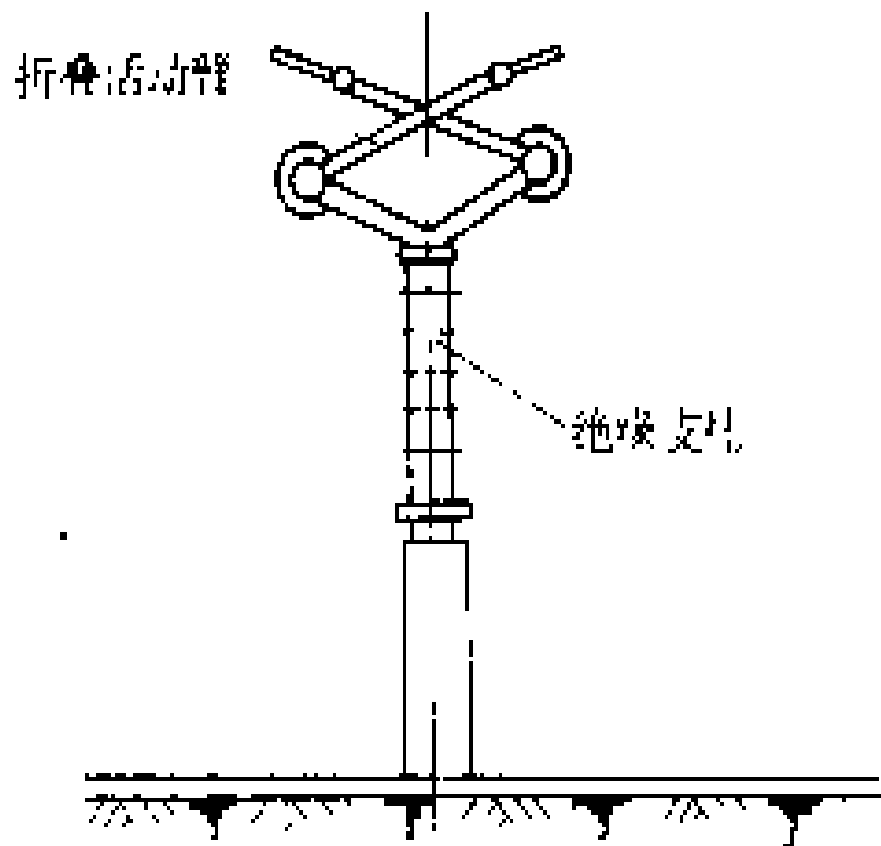
解广润编,过电压及保护,增订版,北京:电力工业出版社,1980  
解广润主编,电力系统过电压,北京:水利电力出版社,1991

(陈慈莹)

danzhushi geli kaiguan  
**单柱式隔离开关** (single post type disconnecting switch) 只有一个绝缘支柱的隔离开关。

由绝缘支柱、折叠活动臂(动触头)和静触头三部分组成,如图所示。

单柱式隔离开关具有占地少、运行维护方便等优点,在中国各级高压配电装置中得到广泛的应用,已形成 220~500 kV



单柱式隔离开关

剪刀式隔离开关的系列产品。半剪刀式隔离开关尚在试用中,由于其折叠活动臂的结构较为复杂,故一般只



用于较高电压等级的高压配电装置。

**绝缘支柱** 用来支持和操作上部导电杆和折叠活动臂。通常由两个支柱绝缘子组成，一个是固定的大直径、高强度支柱绝缘子，起支持导电部分的作用；另一个是活动的小直径、普通强度的支柱绝缘子，能水平旋转，用以操作活动臂，完成断开和闭合的动作。

**折叠活动臂** 隔离开关的导电部分，又称动触头。它安装在绝缘支柱的上部，沿垂直方向起落，以完成断开和闭合的动作。活动臂有两种结构：①单侧折叠活动臂，非对称结构，简称半剪刀式；②双侧折叠活动臂，对称结构，简称剪刀式。折叠活动臂是隔离开关的核心部件，应满足载流量的要求，并具有规定的动、热稳定性，一般用铝合金管或铜管制成。由于单柱式隔离开关的静触头安装在母线上，具有一定的风偏摇摆，故要求折叠活动臂具有足够的长度，使隔离开关在风偏时能可靠的夹住静触头。

**静触头** 隔离开关的不操作的导电部分，通常安装在隔离开关上方的母线上。

(蓝增旺)

daoxian changqi yunxu dianliu

**导线长期允许电流** (permanent permissible current carrying capacity of line conductor)

见输电线路导线截面选择。

daoxian cidangju zhendang

**导线次档距振荡** (sub-span oscillation of conductors)

水平排列的分裂导线相邻两个间隔棒之间的次档距中，两根子导线之间所发生的反向低频振荡现象。振荡的型式以水平方向的位移为主伴以垂直方向的位移而构成椭圆状的运动，且两根子导线的运动往往是不同步的。次档距振荡经常以单波腹形式出现，其振荡频率为1~3 Hz，振幅在导线直径到500 mm之间。风速在3 m/s以上的大范围内，只要风向与线路的夹角在45°以上，次档距振荡随时都可能发生，且与导线是否覆冰无关。地形情况对次档距振荡的严重性有明显的影响，平坦开阔地带，或是近海、近湖泊地区的线路，将会出现剧烈的次档距振荡。

**次档距振荡的后果** 次档距振荡改变了线路的电气参数，增大了线路电晕损失，提高了线路对无线电的干扰水平。但对于现有各电压等级的线路，这些影响较小，尚不构成运行上的突出问题。目前，由次档距振荡引起的主要问题仍是疲劳损坏，如导线、间隔棒、绝缘子和连接金具的损坏等。

**次档距振荡的原因** 互相靠近而又近似处于水平排列的两根子导线，当风速在近乎垂直于线路方向吹

过时，便构成下风侧的子导线处于上风侧子导线的尾流之中。根据空气动力学的原理，处于尾流中的子导线受到阻力和升力的作用，并随迎风角（风向与两根子导线构成的平面之间的夹角）及两根子导线靠近程度的不同而变化，结果使处于尾流中的子导线不稳定，可能按子导线的某个（或接近）自然频率而开始振荡。振荡频率的计算式为

$$f = (n/2l) \sqrt{T/m}$$

式中  $n$  为次档距内振荡的半波数目； $l$  为次档距长度，m； $T$  为子导线的张力，N； $m$  为子导线单位长度的质量，kg/m。

两根子导线的靠近程度，常用子导线间的间距  $S$  对子导线直径  $D$  的比值来表示，即  $k=S/D$ 。当比值  $k \leq 10$ ，便可能出现严重的次档距振荡。对于光滑表面的子导线，次档距振荡发生的机率将增大，这是因为光滑导线具有更宽的尾流区。

**防止次档距振荡的措施** 各种防止措施尚在探求和逐步完善之中。曾尝试将两根子导线作倾斜布置，用来避免尾流效应。但由于绝缘子串及导线将发生风偏，或者子导线间的弧垂本来存在差别，结果下风侧的子导线又回到相邻子导线的尾流之中，特别是在分裂导线数目增加因而尾流区也增多的情况下，尾流的相互作用就无法避免。目前有效的措施是增大分裂导线的间距。当  $k$  值大于15~18时，可以有效地减弱或消除次档距振荡的危害。另一种方法是减小次档距的长度，可以降低次档距振荡的振幅及减小发生振荡的几率，但这项措施要使用较多数量的间隔棒。

在发生次档距振荡时，间隔棒既是一个最薄弱的金具部件，又是控制次档距振荡最有效的装置。大量的试验研究结果说明，机械特性优良的柔性间隔棒，尤其是在间隔棒内设置阻尼元件的阻尼间隔棒，能够显著地控制次档距振荡。同时，间隔棒的安装距离对控制次档距振荡也具有明显的作用，按照优化原则确定的安装距离，甚至比采用优良的阻尼间隔棒还要有效得多。（见架空输电线路金具）

(薄 通)

daoxian fubing wudong

**导线覆冰舞动** (galloping of iced conductor)

沿圆周方向覆冰不均匀的架空导线在侧向风力作用下产生的低频、大幅度自激振动现象。导线舞动时，会在一档导线内形成一个、两个或三个波腹的驻波或行波，导线主要呈垂直运动，有时也呈椭圆运动，椭圆长轴在垂直方向或偏离垂直方向，有时还伴有导线扭转。垂直振动的频率约为0.1~1 Hz，振幅在几十厘米到几米之间。严重的导线舞动是在大档距导线中产生

一个波腹的振动，加上悬垂绝缘子串又沿线路方向摇摆，振幅可高达甚至略高于弧垂最大值（约 10~12 m）。导线舞动的主要原因是导线上有不均匀的覆冰，它与导线无覆冰或均匀覆冰时的微风振动有着本质的不同（见架空线微风振动）。在高纬度地区的冬季，如美国北方、加拿大、日本、苏联、北欧诸国、中国及新西兰等地，当气温在 0~-10℃ 或更低时，风速在 2~25 m/s 或更高时，风向与线路走向夹角在 45°~90° 范围内时，覆冰不均匀的导线就可能产生舞动。

**导线舞动带来的危害** 在导线舞动的线档中，相导线之间、导线与架空地线之间以及耐张型杆塔跳线与塔身之间的距离减少，会引起闪络或碰线，从而烧伤线股或烧断导线，造成停电事故。长时间的导线舞动，还会造成：①横担损坏或连接螺丝松动；②悬垂绝缘子串尤其是 V 形绝缘子串受到压缩荷载，磨损脚球与球窝，碾碎锁紧销，折断脚球，使球窝连接脱开；③悬垂线夹处的导线断股；④铰连式连接金具严重磨损或疲劳断裂，开口销、闭口销被挤出，球头挂环折断，U 形环磨损，间隔棒与防振锤损坏。有的金具经长期磨损已经受伤，一旦经受暴风雪就会损坏。

**产生舞动的机理** 自 20 世纪 20 年代末在美国首先发现导线舞动现象以来，解释舞动的机理有许多，但都不完善。其中主要的有邓哈陀机理和自激扭转机理两种。

**邓哈陀机理** A. E. 达维逊在 1930 年已发现导线舞动是由不均匀覆冰的升力引起的，他认为只要覆冰导线的升力大于覆冰导线的重力就可形成舞动。这显然是不完善的。J. P. 邓哈陀 (J. P. Den Hartog) 在 1932 年提出的导线舞动机理，认为当水平风成 90° 角吹向圆形断面的导线时，因为断面对称的缘故，作用在导线上的力始终和风力同方向。导线向上运动时，相当于空气相对向下运动，与水平的风合成后的风偏向斜上方吹下来。作用在导线上的力的垂直分量，方向朝下，阻碍导线向上运动。同理导线向下运动时，受到向上的阻力。因此导线不会产生舞动。但风力作用在另一类断面上时，作用力方向不一定与风向相同，例如对机翼可以产生与风向成 90° 角的升力。要使导线上下振动，则需要交变的升力。当水平的风吹向图 1 中向下运动的断面时，相当于风从斜下方吹上来，它的作用力可分解成与风向成 90° 角的分力（升力  $L$ ）和平行于风向的分力（阻力  $D$ ）。这两者在垂直方向上的分量相加，合成一个向上的作用力  $F$ （与断面运动方向相反），见图 1。于是

$$F = L \cos \alpha + D \sin \alpha$$

$$\alpha = \arctan(-v/V)$$

式中  $\alpha$  为攻角； $v$  为断面上下运动的速度，m/s； $V$  为

水平风速，m/s。即向上的作用力  $F$  随  $\alpha$  角或  $v/V$  的变化而变化。因为断面运动速度  $v$  比风速  $V$  小得多，故  $\alpha$  角较小，所以有  $\alpha = \arctan(-v/V) \approx -v/V$ ，故  $dF/d\alpha = -V dF/dv$ 。由于自激振动可解释为具有负阻尼的自由振动，正值粘性阻尼力是与振动速度成正比而方向相反的力，负值阻尼力是与速度成正比而方向相同的力，因此负值阻尼将使自由振动的振幅增加。故  $dF/d\alpha < 0$  相当于  $dF/dv > 0$ ，即作用力  $F$  的方向与断面运动方向相同，此时阻尼力对受作用的系统做正功，转化为动能，使振幅不断加大，导线便开始自激振动而不稳定。因  $\alpha$  角很小， $\cos \alpha \approx 1$ ， $\sin \alpha \approx 0$ ，故  $dF/d\alpha = (dL/d\alpha) \cos \alpha - L \sin \alpha + (dD/d\alpha) \sin \alpha + D \cos \alpha \approx dL/d\alpha + D$ 。当  $dL/d\alpha + D < 0$  时，系统是不稳定的，也即当升力曲线的负斜率大于阻力的纵坐标时，该断面是动力不稳定的。

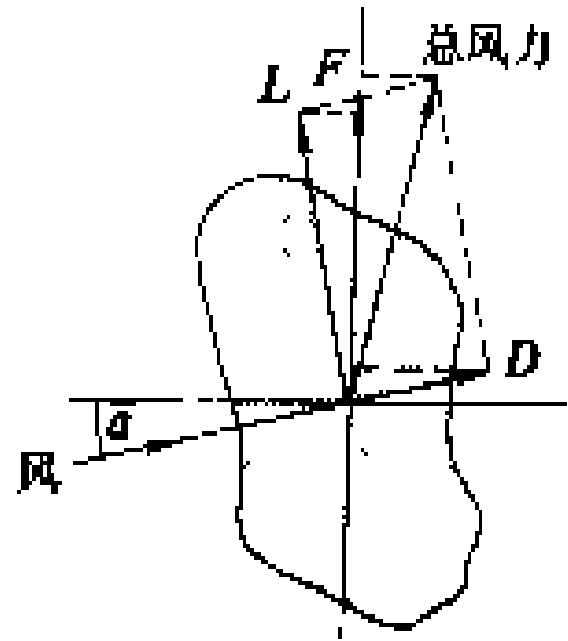


图 1 合成风力分解成一个升力  $L$  和一个阻力  $D$

图 2 表示一个伸长的断面在风洞中得到的实验结果。伸长的断面“沿风向”时 ( $\alpha = 0^\circ$ ) 是稳定的。而在“横跨风”时 ( $\alpha = 90^\circ$ ) 是不稳定的。当断面向上运动时，相当于风从左上方吹下来，朝右上方的升力  $L$  在垂直方向上的分量，超过阻力  $D$  在垂直方向上的分量，两者相减后向上的作用力推着导线向上运动，直到导线的回弹力超过该作用力而使运动停止，速度  $v$  变为零。回弹力又迫使导线下降，有了向下运动的速度，在垂直方向上的向下作用力又推着导线向下，如此作上下振动。在  $\alpha$  为  $30^\circ \sim 150^\circ$  范围内，升力曲线的斜率都是负的，舞动只能在此范围内发生。根据观测，在开始时，一档内经常只有一些波长短、振幅小的行波来回传播，随着波长、波幅不断增加，最后稳定成几个驻波。

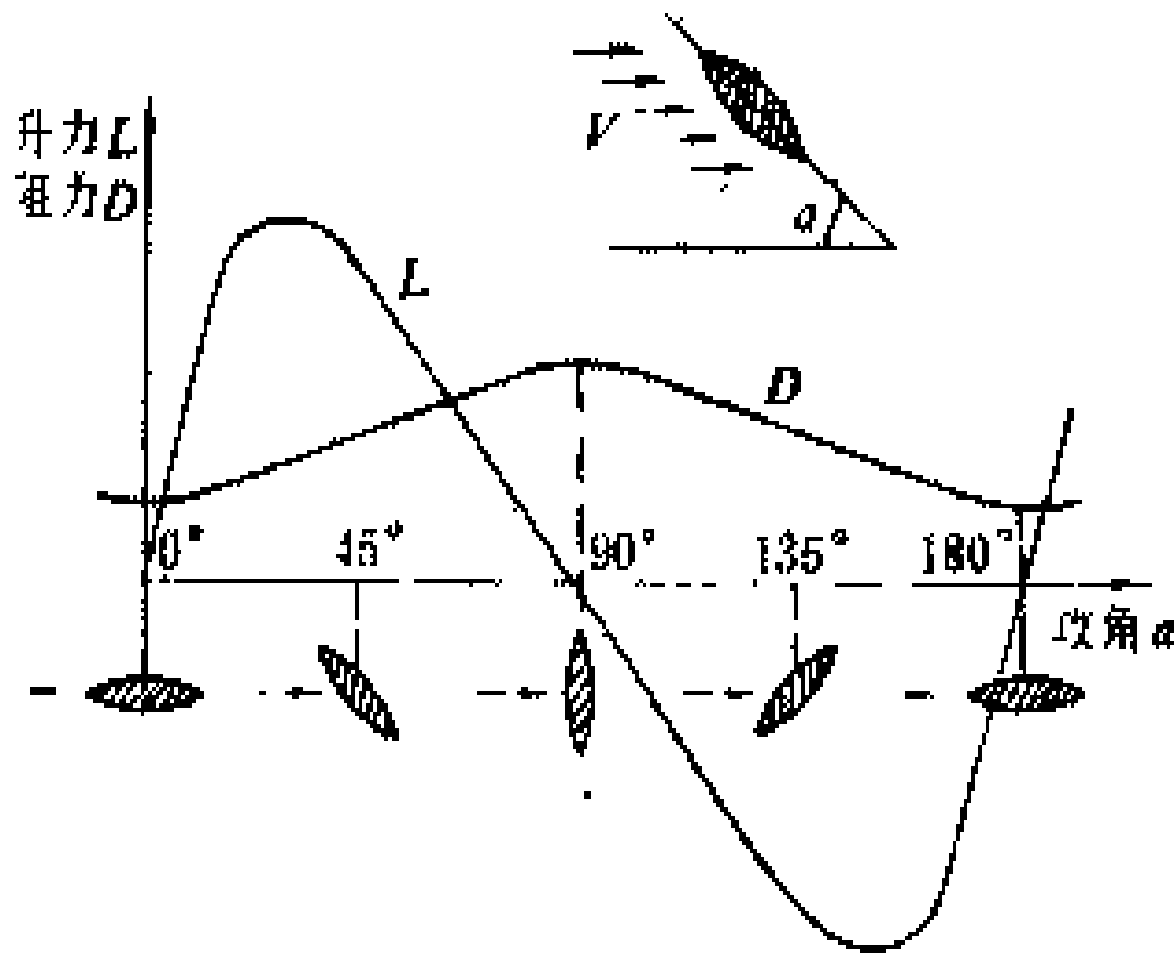


图 2 伸长断面的升力、阻力与攻角的关系

**自激扭转机理** 实际的导线舞动有时伴有导线扭转运动，而且是覆冰后伸长断面在水平方向时出现舞动。这与邓哈陀机理是不相符的。O. 尼戈尔

(O. Nigol) 于 1974 年以来提出了自激扭转机理, 指出导线上月牙形覆冰产生的偏心重力矩, 使导线易于倾翻转动。当作用在冰翼上的空气动力矩与冰的偏心重力矩方向相同, 则等效于导线的扭转刚度降低。覆冰要增大导线的转动惯量, 而导线扭转固有频率取决于扭转刚度与转动惯量之比的平方根, 因此其扭转固有频率随冰层厚度和风速的增加而降低。当空气动力扭转阻尼是负值且大于导线扭转的固有阻尼时, 导线开始自激扭转, 而此时尚未有垂直振动。扭转角的变化引起攻角  $\alpha$  变化, 通过空气动力的作用, 使升力  $L$  与阻力  $D$  也得到交替的变化, 而诱发导线作垂直振动。当扭转频率与垂直振动频率重合时, 垂直方向上交替变化的作用力与垂直振动形成共振, 则舞动开始。邓哈陀机理中, 攻角  $\alpha$  的变化是由导线垂直振动速度变化, 导致合成风向改变而引起的, 变化较小。自激扭转时除上述攻角之外加上扭转的角度, 使总的攻角变化加大, 得到变化较大的升力和阻力。因此, 根据邓哈陀机理判断不会发生舞动的水平状伸长断面 ( $\alpha=0^\circ$ ), 在向上运动时, 冰翼的前沿朝上扭转或顺时针扭转, 在向下运动时, 冰翼前沿朝下扭转或逆时针扭转, 于是图 2 中的最左侧断面 ( $\alpha=0^\circ$ ) 也会在从左边吹来的水平风时得到一个推动导线的作用力, 从而使垂直运动也可能在升力曲线正斜率范围内产生。顶部覆冰的单导线在冰、风联合作用下, 扭转固有基频  $f_T$  与垂直振动固有基频  $f_{V1}$  的计算公式为

$$f_T = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{S - \frac{l^2}{\pi^2} m_i g r \cos(\theta + \theta_0) - \frac{dM_a}{d\alpha} \times \frac{l^2}{\pi^2}}{\frac{1}{2} m r^2 + m_i r^2}}$$

$$f_{V1} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{m + m_i}}$$

式中  $l$  为档距,  $m$ ;  $S$  为单位长度导线扭转刚度,  $N \cdot m^2/rad$ ;  $m$  为单位长度导线质量,  $kg/m$ ;  $m_i$  为单位长度导线覆冰质量,  $kg/m$ ;  $r$  为导线半径,  $m$ ;  $\theta$  为月牙形覆冰导线对垂直线的扭转角,  $rad$ ;  $\theta_0$  为冻雨方向对垂直线的偏角,  $rad$ ;  $M_a$  为单位长度导线的空气动力矩, 根据冰翼方向可正可负,  $N \cdot m$ ;  $T$  为导线张力,  $N$ 。

不覆冰的单导线 ( $M_i=0$ ,  $M_a=0$ ) 的  $f_T/f_{V1}$  约为 6~10,  $f_T$  与  $f_{V1}$  相差较大, 自然不会舞动。随着冰厚增加, 风速加大 (将风速折算为等效冰厚), 导线张力也随之增加, 垂直振动各阶固有频率降低并不多 (见图 3 中略为倾斜的三条直线  $f_{V1}$ 、 $f_{V2}$ 、 $f_{V3}$ ), 而扭转固有基频却随冰风荷载增加急剧下降。它首先与  $f_{V3}$  相交, 表示扭转频率与三阶垂直振动频率重合, 产生三个波腹的舞动。当冰风荷载继续增加时, 又变为两个波腹或

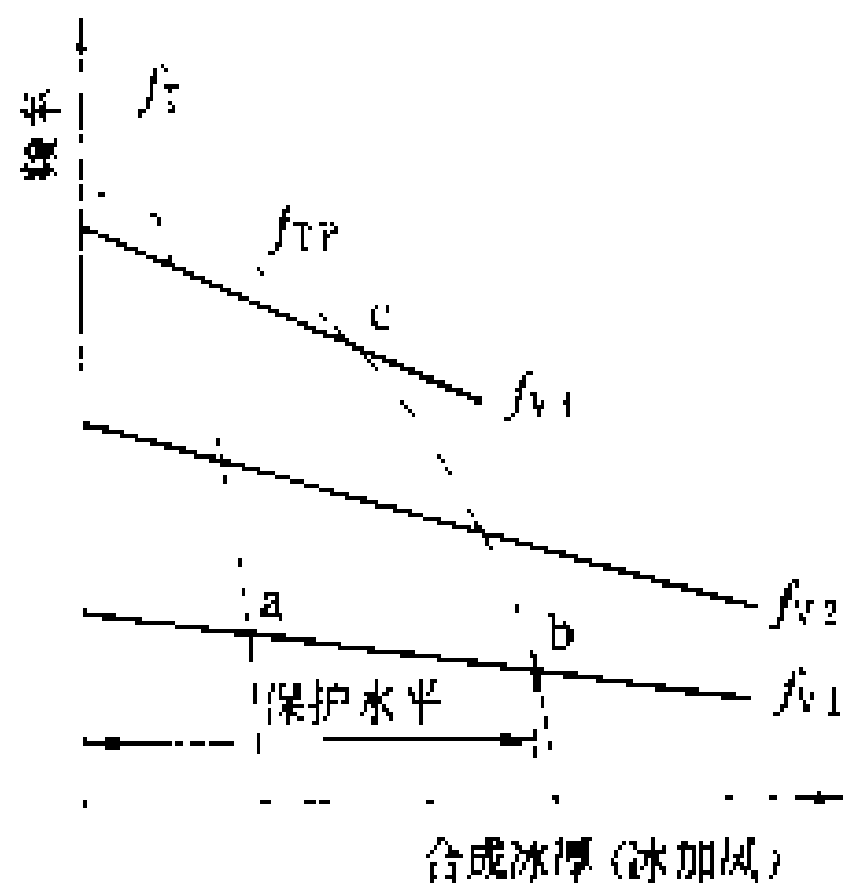


图 3 单导线的扭转、垂直振动自然频率与冰风荷载的关系

一个波腹的舞动。图 3 中 a 点的横坐标表示开始舞动时的冰厚加风速折算成等效冰厚后的合成冰厚, 称之为舞动起始水平。据观察, 开始时往往是档距中部水平段导线先发生自激扭转, 逐渐扩大到全档, 同时发生垂直振动。

**防止舞动事故的措施** 主要有: ①消除或减弱舞动的后果; ②减小舞动的振幅; ③消除或减少产生舞动的原因。

**消除或减弱舞动的后果** 为防止因闪络碰线引起的停电和导线烧伤等事故, 水平排列的导线可加大相间距离, 垂直排列的导线改为水平排列。垂直排列的中相作水平位移, 跳线中部加悬垂绝缘子串或将软跳线改为硬管跳线。中、低压电力线路的档中用绝缘的相间间隔棒夹住相导线, 使之不能靠拢。按图 4 的不等距安装相间间隔棒, 可使各段导线固有频率不同, 互相干扰而减小振幅。

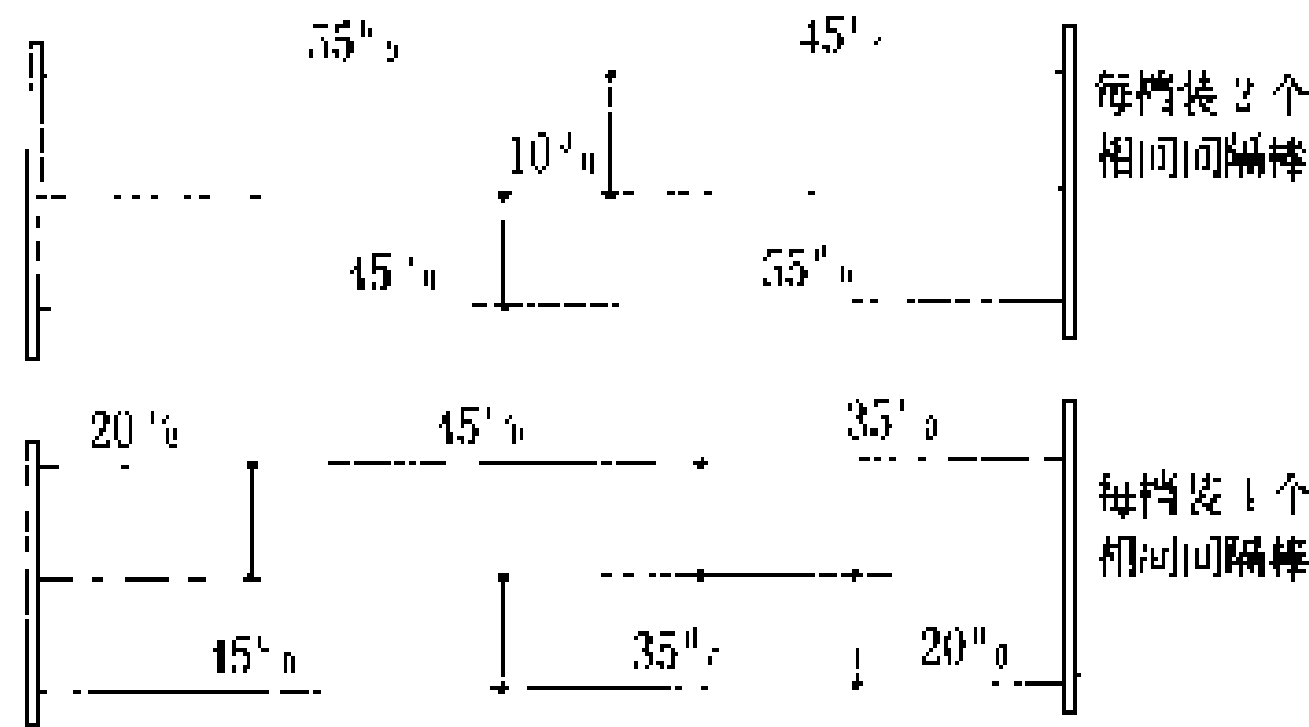


图 4 相间间隔棒装设位置图

**加强线路零部件的机械强度和抗疲劳强度, 或改善结构设计, 在线夹内加护线条保护导线, 用螺母、螺栓紧固代替开口销、轴连接。**

**减小舞动的振幅** 用增加导线运动的阻尼或避免扭转振动与垂直振动频率相同的方法, 来减小振幅。一般档距只要抑制一、二、三个波腹的舞动即可, 再多波腹的振幅较小, 可不考虑。以上三种波腹的波峰波谷在档距  $l$  的  $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{3}{4}$ 、 $\frac{1}{6}$ 、 $\frac{5}{6}$  处, 波节在  $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{2}{3}$  及两端。装设防舞动装置时须尽量避开节点, 装在靠近波峰波谷处, 但要统筹兼顾。还可采取不等距安装, 利用各段导线长度不同, 互相干扰, 进一步减小振幅。

(1) 风阻尼器。由两块长的凹槽形金属板背靠背地固定在一起, 凹槽口朝外, 通过夹具夹紧在导线下方。经风洞试验得出, 风阻尼器具有较大的阻力和正斜率

的升力曲线。这种装置符合邓哈陀机理稳定性判据  $dL/d\alpha + D > 0$  是稳定的原理。风阻尼器的凹槽长一般为 1.2~1.8m。一档导线需装设风阻尼器的数量根据档距、线径和风阻尼器大小而定。风阻尼器适用于单导线和分裂导线的线路。类似原理的装置还有多孔圆筒阻尼器等。

(2)失谐摆。在单导线下方安装的一质量为  $M$  臂长为  $R$  的重锤。如图 5 所示，导线顶部覆冰偏转时，重锤离开平衡位置，它的回复力矩方向总是和冰的偏心重力矩方向相反。空气动力矩的方向与攻角有关，可正可负。通常摆锤抵消冰、风的力矩，增加导线的等效扭转刚度和固有扭振基频，但对垂直振动各阶固有频率影响很小。单导线装失谐摆后的扭振基频  $f_{TP}$  和垂直振动基频  $f_{VIP}$  的计算公式为

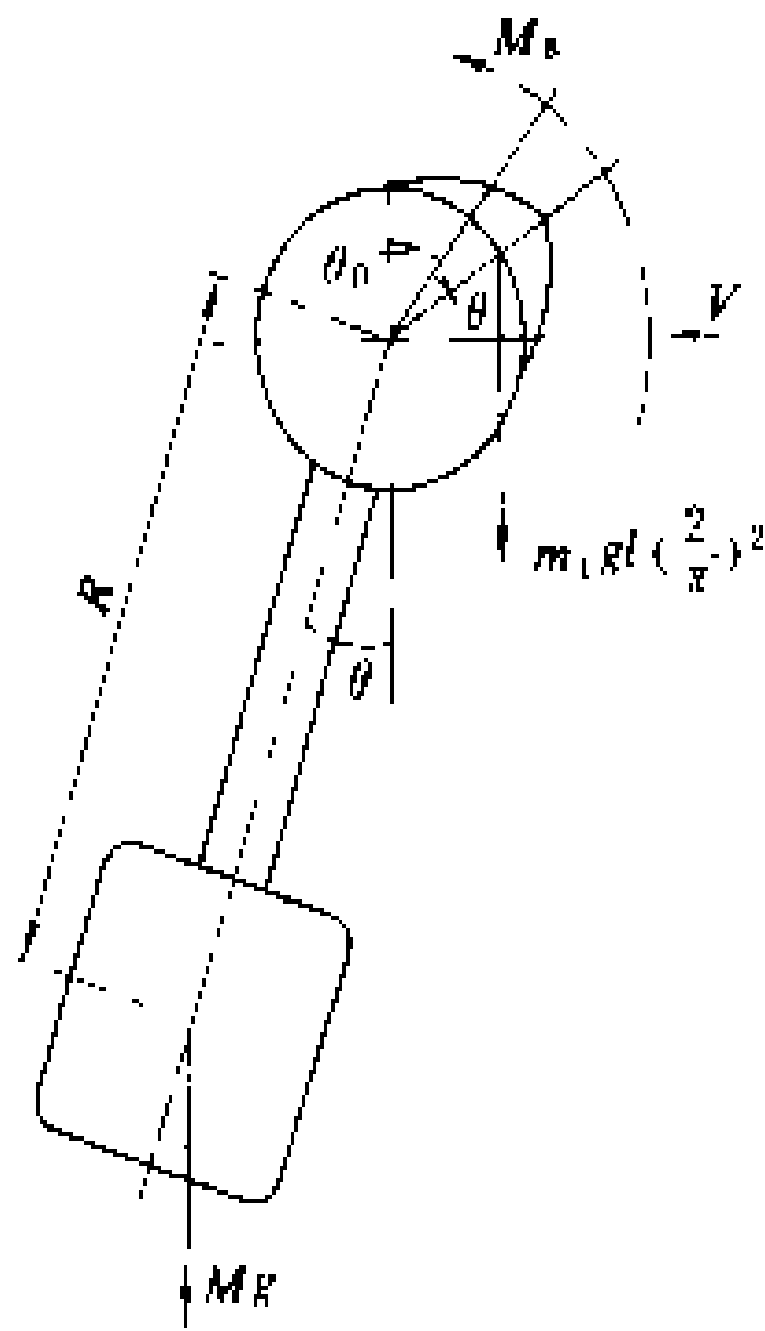


图 5 失谐摆作用图

$$f_{TP} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{S - \frac{l^2}{\pi^2} m_i g r \cos(\theta + \theta_0) - \frac{dM_s}{d\alpha} \times \frac{l^2}{\pi^2} + \frac{1}{4} M g R l \cos \theta}{\frac{1}{2} m r^2 + m_i r^2 + \frac{\pi^2 M R^2}{4l}}}$$

$$f_{VIP} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{m + m_i + M/l}}$$

设计摆的质量与臂长，使得在一定的冰风荷载下，导线与摆的扭振基频  $f_{TP}$  大于它的垂直振动三阶频率，而且曲线  $f_{TP}$  的值随冰风荷载增加缓慢下降，将  $f_{TP}$  与  $f_{V3}$  的交点推至冰风荷载很大之处，如图 3 中点划线上的交点 c。这表示在一般中等冰风条件下，避免了三波腹的舞动，也即避免了两波腹和一波腹的舞动。一般选无冰风时，单导线与摆的扭振基频是垂直振动基频的 4.5 倍，它高出三阶频率 1.5 倍，又不同于四阶频率、五阶频率，所以在中等冰风荷载下不会发生舞动。图 3 中 b 点的横坐标称为保护水平，表示装了失谐摆后发生舞动时的合成冰厚。此值愈大表示愈难发生舞动。由上述关系可选择摆臂长  $R$  与摆的质量  $M$  为

$$R = \left( \frac{l}{4.5\pi} \right)^2 \times \frac{mg}{T}$$

$$M = \frac{81Tr(m + m_i)}{mgl}$$

分裂导线与单导线不同，它的扭振基频与垂直振动基频之比仅为 1.13 倍，这意味着稍有冰风即可舞

动。而且这两者的二阶、三阶频率都很接近。此时，不能再要求扭振基频是垂直振动基频的 4.5 倍，只将扭振基频提高振动基频的  $\sqrt{3}$  倍，离垂直振动基频较远，离二阶频率较近，以此推迟常见的两波腹舞动和严重的一波腹舞动的出现。分裂导线电压较高，长臂的摆锤会产生电晕，一般取

$$R \leq \frac{1}{2} d$$

$$M = \frac{4Tnd}{gl \cos \theta}$$

式中  $d$  为分裂导线束圆的直径， $m_i$ 、 $n$  为子导线根数。所选失谐摆的质量  $M$  太大时，可分成 3 个或更多的小摆锤，分别装在  $\frac{2}{9}l$ 、 $\frac{1}{2}l$ 、 $\frac{7}{9}l$  三处或更多处，对一、二、三个波腹的舞动均有失谐作用。

类似失谐摆原理的装置尚有扭转阻尼器、偏心重锤等。

消除或减少产生舞动的原因 风的作用和不均匀覆冰是导线舞动的根源。采用短路电流热效应、低居里点合金发热融冰，或避开风口、避开垂直风向来防止舞动，有时是很难实现的。实际工程中有几种用改变覆冰形状以改变空气动力特性的防舞动方法。

(1)防舞动片。在导线下方挂一块长高比为 1.5 的铝或铁片。覆冰期间风速常变化，吹得铝片带动导线不停地扭转，因此靠近铝片这一段导线覆冰较圆。远离防舞动片的导线覆冰就偏向一方。在一档的  $l/4$  和  $3l/4$  两处，各挂一块与垂

直线成左、右 45° 角的薄片，不论风从哪边吹来，由于防舞动片的扭转角不同，因此一档导线的覆冰形状及升力处处不同，互相干扰抑制了舞动，如图 6 所示。防舞动片的大小根据档距、线径的大小而定。

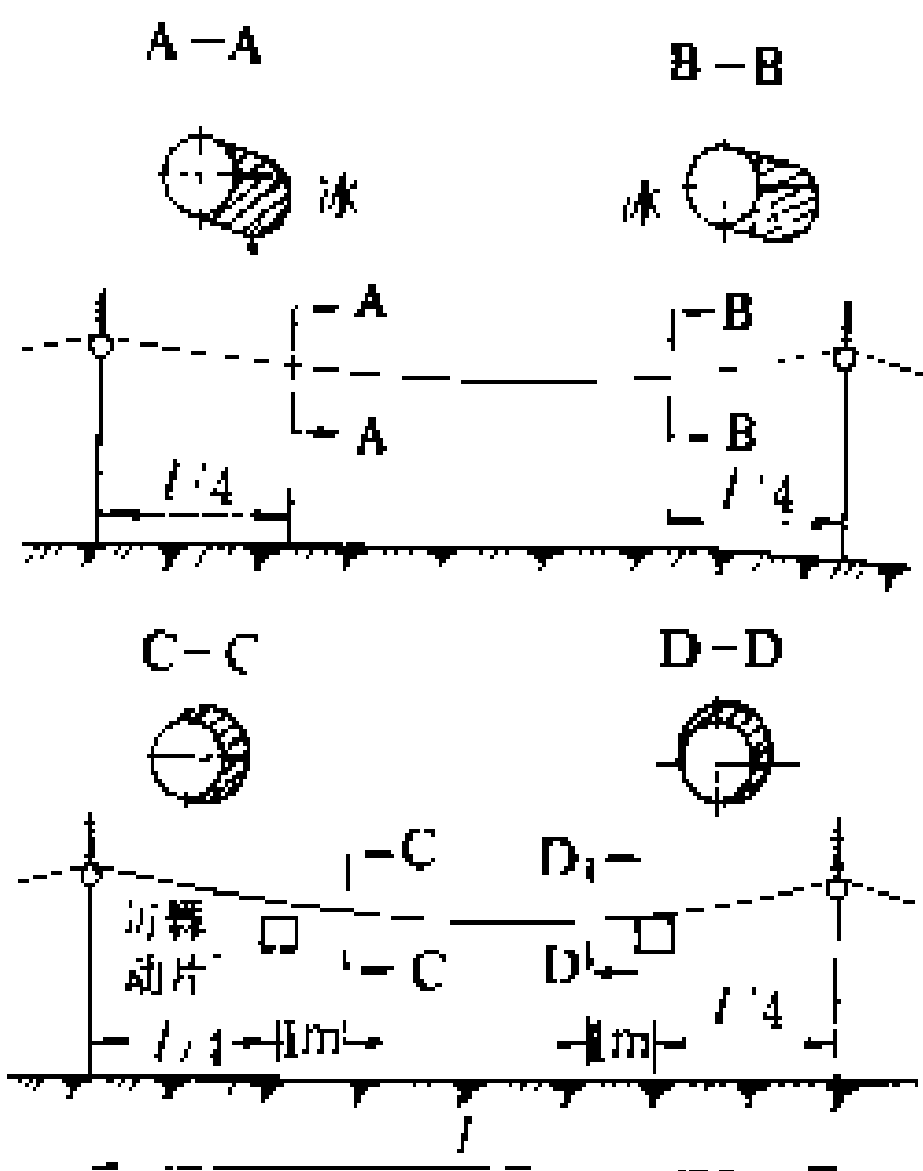


图 6 防舞动片对覆冰形状的影响

(2) 气流干扰 按被保护的导线线径选用一定直径的非金属丝绕成，其两端各有一握紧段，中间是两个干扰段。如图 7 所示，由于干扰线的作用，使得导线各处覆冰形状不同，从而抑制导线舞动。它尚有防微风振动的第二功



能。

此外,在新建线路时,用两根相同的导线每隔一定长度互相扭绞 360°作为一根相导线,使覆冰的椭圆形冰翼每隔一定长度也扭绞一周,以及双分裂导线拆去间隔棒或者用旋转夹头间隔棒,都可以使全档各处覆冰形状不同,从而使各处升力互相抵消,以减少导线舞动。

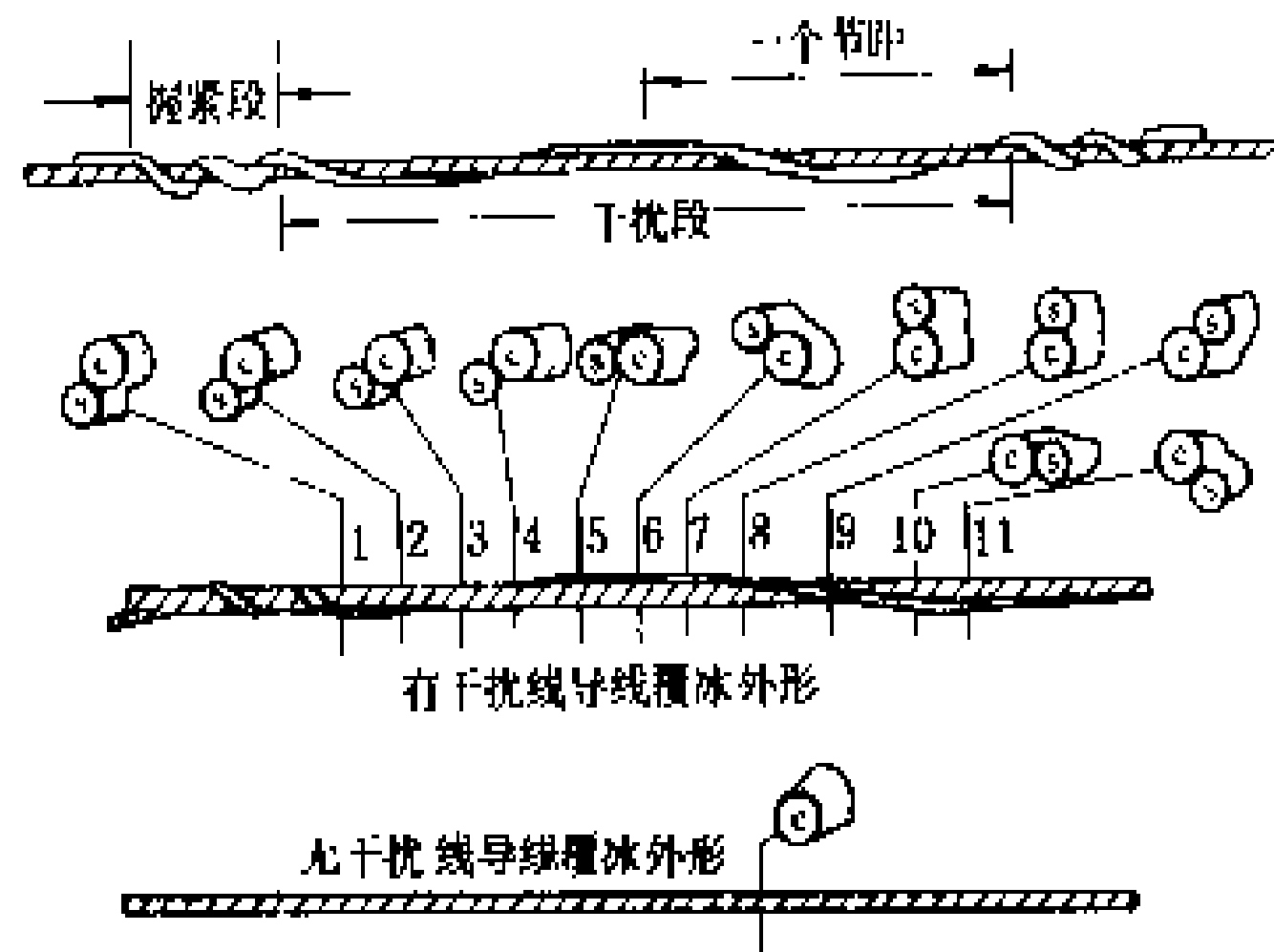


图 7 气流干扰线对覆冰形状的影响

c—导线; s—干扰线

**舞动现象及防止方法的研究** 近年来,导线舞动现象及危害越来越多,已引起各国重视。中国自 1985 年冬以来,在东北、华北、华中等地发生多次导线舞动,造成停电和部件损坏。国外的研究重点及分歧在于对舞动机理的解释,例如长轴在水平方向的冰翼,按邓哈陀机理判断不会发生舞动,而实际上发生了舞动。又如有些严重的舞动发生在覆冰很薄(小于 2.5mm)的时候,冰的偏心重力矩和空气动力矩均很小,按自激扭转机理,扭转刚度和扭转固有频率降低很小,是不致产生自激扭转而引起舞动的。另外在实验室中也得到一些与邓哈陀机理不符的结果,如约束扭转就停止垂直振动,舞动也可以在升力曲线的正斜率区发生。然而根据上述两种机理设计的风阻尼器和失谐摆,均有一定的防舞动效果。因此,目前争论的主题是舞动到底服从邓哈陀机理还是服从自激扭转机理。反之,也有人认为所有的空气动力阻尼装置,包括风阻尼器都是装在导线的下方,起着摆的作用。失谐摆有一定的迎风面积,起着阻尼风的作用。上述两种机理不过是一个复杂理论的简化而已,均有其适用与不适用的方面。对舞动的起因尚有偏心惯性耦合机理、振型阻尼比机理、轴向-扭转耦合机理等不同的解释。

(王孟晋)

daoxian jingji dianliu midu

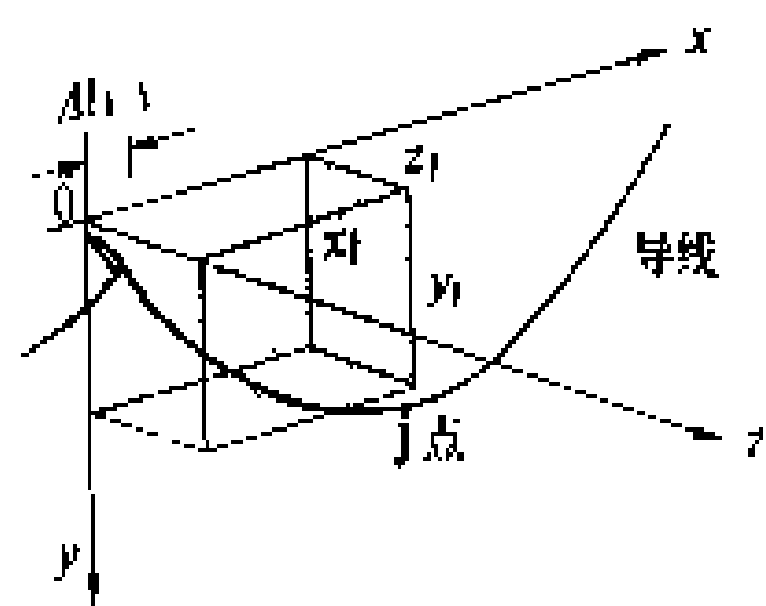
**导线经济电流密度** (economical current density of line conductor) 见输电线路导线

截面选择。

daoxian tuobing tiaoyue

**导线脱冰跳跃** (conductor sleeting jump)

覆冰地区架空导线脱冰时发生的突发性低频率、大幅值的上下跳跃现象。当导线覆冰时,随着冰凌荷载的增加,其张力和弧垂将逐渐增大,获得了相应的弹性能 and 重力势能。当气温回升或者受到风力扰动影响,使得导线上大部分或整档的冰凌同时脱落,覆冰时所储有的势能迅速转化为动能,使导线向上弹起,形成几米甚至十几米的大振幅半波,



导线跳跃的瞬间状态

其频率在 0.1~1.0 Hz 之间。在导线上下连续运动的过程中,由于受到自身及两侧绝缘子串的惯性力、线股内的摩擦力以及空气阻力等的

制约而很快衰减,一般仅持续一分钟左右即自行消失。

导线跳跃的瞬间状态如附图所示,其运动方程式为

$$\begin{aligned} W_1 \times \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \left( T_1 + \xi \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right) \frac{\partial y_1}{\partial x_1} \right] \\ &- \eta \left[ \frac{\partial y_1}{\partial t} \sqrt{\left( \frac{\partial y_1}{\partial t} \right)^2 + \left( \frac{\partial z_1}{\partial t} - V \right)^2} \right] + W_1 \\ W_1 \times \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \left( T_1 + \xi \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right) \frac{\partial z_1}{\partial x_1} \right] \\ &- \eta \left[ \left( \frac{\partial z_1}{\partial t} - V \right) \sqrt{\left( \frac{\partial y_1}{\partial t} \right)^2 + \left( \frac{\partial z_1}{\partial t} - V \right)^2} \right] \end{aligned}$$

式中  $W_1$  为脱冰档导线自重及冰重, kN;  $T_1$  为导线水平张力, N;  $\xi$  为导线内摩擦力引起的衰减系数;  $\eta$  为空气阻力引起的衰减系数;  $\epsilon$  为导线变形量, m;  $V$  为横向的水平风速, m/s。

导线脱冰时的跳跃高度与脱冰量、弧垂、档距、两侧绝缘子串的悬挂方式以及相邻档导线的张力等因素有关。从现场观测和模拟试验资料中可以得出:①导线脱冰量不仅与覆冰大小有关,而且还取决于冰凌的性质。当覆冰为附着力较强的雨凇、混合凇时,通常只是一段一段掉脱,很难形成大的脱冰跳跃现象。反之,如果覆冰为附着力较弱的雾凇或湿雪时,则较容易出现整档导线同时脱冰而导致导线强烈跳跃。试验资料表明,当脱冰量达到 3.0 kg/m 及以上时,导线的跳跃幅值可以接近最大弧垂的大小。②在同等条件下,跳跃高度与最大弧垂的比值随档距的增大而减小。③在连续档导线的跳跃过程中,由于受到相邻档导线张力的作用而使跳跃幅值增大;同样,由于两侧悬垂绝缘子串摆动的影响,即使脱冰量增大,当跳跃幅值达到最大弧垂以后即趋于饱和,不再显著增大。④导线在跳跃时,如果同时有横向风力作用,则在上下垂直运动中还会伴



有横向摆动,其摆动的幅值由风力大小决定。⑤导线跳跃运动轨迹的范围,过去一直沿用“李沙育椭圆形”来决定,20 世纪 60 年代日本通过试验和理论分析认为,如果不出现强风和无应力状况,一般可简化为正三角形来决定,即三角形的底宽等于导线横向摆动距离的两倍,其垂直高度等于最大跳跃高度。

脱冰跳跃是导致重冰地区输电线路导线与架空地线以及导线间接近而遭致闪络事故的主要原因之一。采用增大上下导线间的垂直和水平距离,能较有效地防止这类事故的发生。

(李拔群)

daoyin dianlan

**导引电缆** (pilot cable) 电力系统继电保护装置中采用纵差保护装置的连接电缆,也是在电力电缆线路中使用较多的一种辅助电缆。

导引电缆的结构和电力电缆基本相同,因为它用于二次回路并不输送电力负荷,因此其直径一般很小。

一般导引电缆随同电力电缆同一路径平行敷设,因此电力电缆对导引电缆的感应干扰电压较大,在设计电缆线路时,必须认真计算和采取措施,降低感应电压。为降低导引电缆的感应干扰电压,导引电缆结构上要有良好的电磁屏蔽,降低屏蔽系数,线芯必须采用二芯对绞,以降低二芯间的横向感应电压,绝缘水平要高于一般的电缆线路控制电缆,以满足运行

需要。当导引电缆引入到发电厂或变电所内时,为了使导引电缆和厂区控制室内的交直流回路不再有直接的电联系,以防止过电压侵入,还需采取保护和隔离措施,如加装电源隔离变压器及高压继电器(5 kV 级),或采取安装中和电抗器、放电器、排流电抗器等。

(许精潜)

Deguo Falanketu 420 kV xinan bianliansuo

**德国法兰克福 420 kV 西南变电所** (south-west Frankfurt 420 kV substation of Germany) 位于德国法兰克福市西南郊,420 kV 出线 2 回(最终 4 回),123 kV 出线 12 回(最终 15 回),

2 台 360 MV·A 三相式主变压器(最终为 3 台)。

**420 kV 配电装置** 采用屋内式气体绝缘金属封闭电器(简称 GIS)。所有高压电气设备,包括断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、金属氧化物避雷器以及母线、分支连接线均安装在密封的圆筒内,筒内充以 SF<sub>6</sub> 绝缘气体,由于电流较大,圆筒采用铝合金材料制成。GIS 的额定电压为 420 kV,额定电流为 4000 A,雷电冲击绝缘水平为 1550 kV,操作冲击绝缘水平为 1175 kV。由于所有设备都安装在绝缘的圆筒内,因此布置非常紧凑,两个回路之间的中心距离仅为 3.6 m,比普通 420 kV 敞开式电气设备的回路间中心距离(一般为 18 m)减少了 80%。整个 420 kV 配电装置布置在长 45 m、宽 16.5 m、高 10.5 m 的钢结构建筑物内部。420 kV 进线和出线仍然采用架空软导线,架设在屋外终端门型构架上,采用软导线支接至 420 kV GIS 的进线和出线的绝缘套管上。420 kV 配电装置布置的断面图如图 1 所示。

**123 kV 配电装置** 采用屋内式 GIS,额定电压

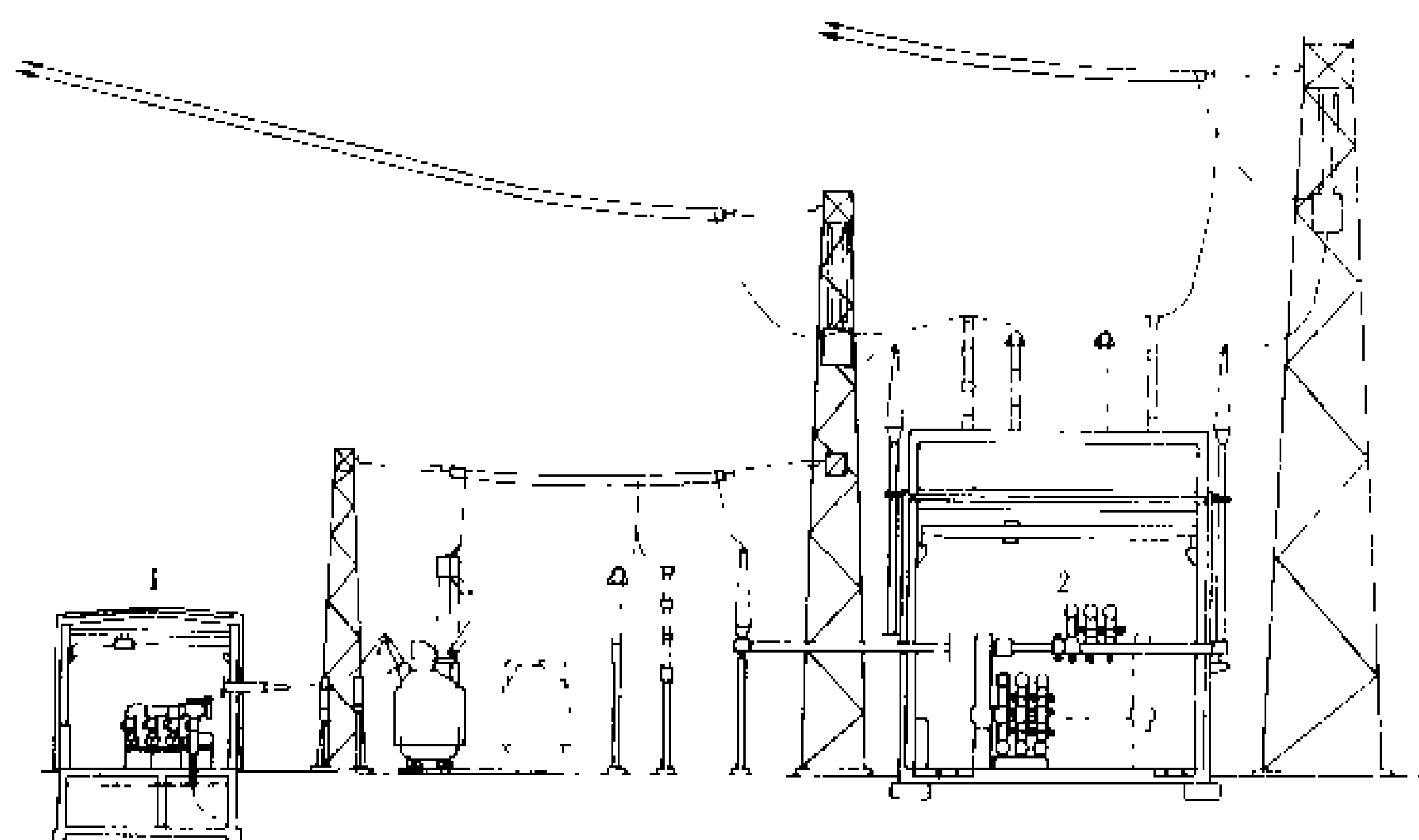


图 1 123 kV 和 420 kV GIS 断面图

1—123 kV 屋内 GIS; 2—420 kV 屋内 GIS

123 kV,额定电流 2000 A,断路器的额定开断电流为 26.2 kA,热稳定电流为 26.2 kA(1 s),雷电冲击绝缘水平为 550 kV,工频耐压水平为 230 kV(1 min)。两个回路之间的中心距离为 1.8 m,比普通 123 kV 敞开式电气设备回路间的中心距离(一般为 8 m)减少了 77.5%。其布置断面图见图 1。

**总体布置** 由于 123 kV 和 420 kV 配电装置均采用户内式 GIS 因此全所布置非常紧凑占地面积很小。420 kV 配电装置布置在全所的右半部分 123 kV 配电装置布置在全所的左半部分,中间部分安装 3 台主变压器,在主变压器旁边设置一条运输道路,横穿变电所南北,没有其它的环形运输道路,总体布置简捷、明快。

全所东西方向长为 92 m,南北方向宽 72 m,总共占地面积 6625 m<sup>2</sup>,是采用敞开式电气设备的普通 420 kV 变电所占地的 25%左右,全所总体布置如图 2 所示。

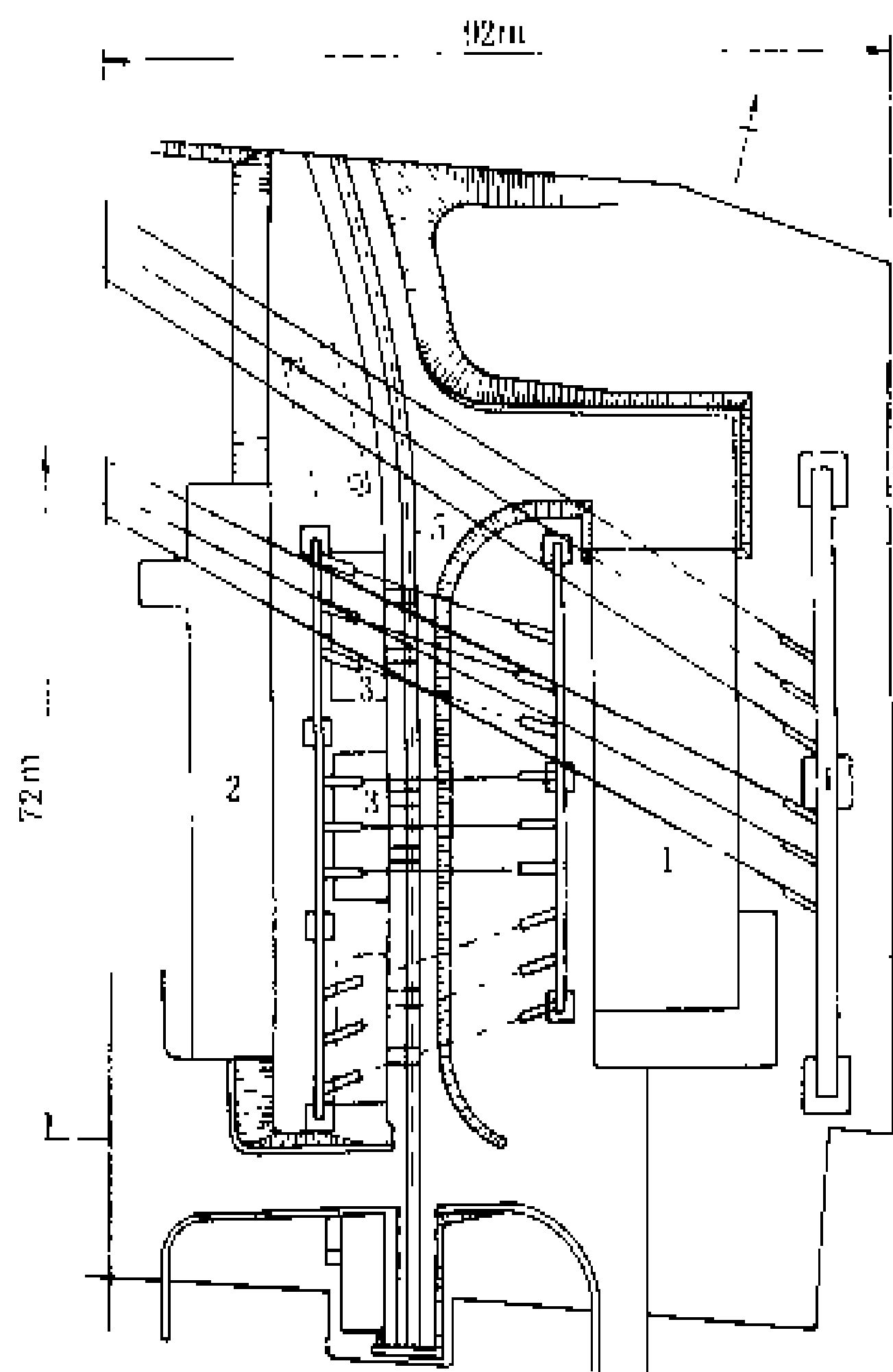
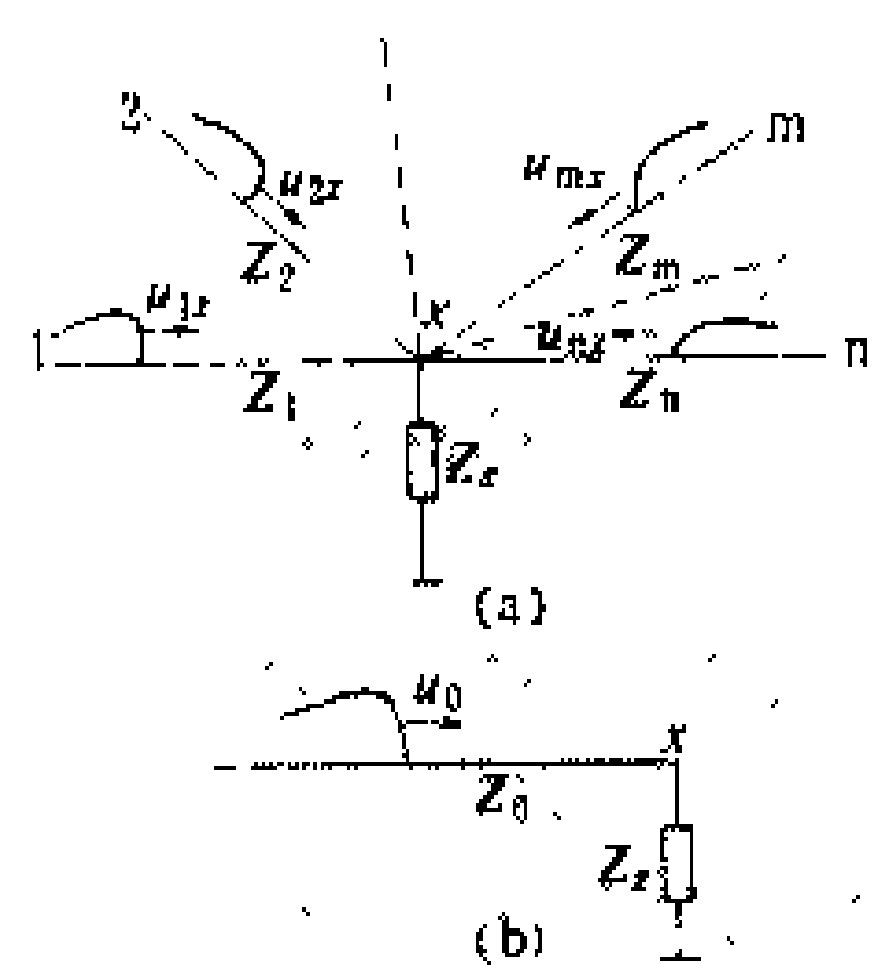


图 2 全所总平面布置图  
1—420 kV GIS; 2—123 kV GIS; 3—主变压器;  
4—420 kV 出线门型构架; 5—主变压器运输道路  
(蓝增旺)

dengzhibo faze  
**等值波法则** (principle of equivalent wave)

不同幅值的行波分别沿不同波阻抗的多根导线入



用等值单导线取代多导线系统  
(a) 连接于一点的 n 根导线;  
(b) 等值单导线

式中  $Z_m$  为第  $m$  根导线的波阻抗;  $u_{mx}$  为沿第  $m$  根导线传向  $x$  点的电压波。

等值波法则只适用于和结点相连的诸线路均为无

穷长,且各导线间无耦合的情况。如果导线为有限长,则只适用于波在最短的那条线路末端的反射波还没有传播到结点的时间内。

(陈慈莹)

diwen youzu dianlan

**低温有阻电缆** (cryo-resistive cable)

利用深冷技术使电缆线芯在极低温度(约 80°K)下运行从而大大降低导体电阻的电缆。低温有阻电缆常用的致冷介质为液氮,其价格低廉且安全可靠。低温有阻电缆适用于高电压大容量的传输,但尚无定型结构,其主要原因是致冷系统的稳定性与可靠性难于达到要求。

低温有阻电缆有单芯的和三芯的两种型式。单芯的结构简单,易于安装,但成本贵,而且电缆保护管感应电压较高。三芯的结构复杂,但可节省投资且占地面积小。低温有阻电缆的导体结构有柔软的和硬性的两种。软导体是由非金属空心管和围绕在管子表面的铝绞线组成,其缆芯绝缘一般由低温介质浸渍的绝缘带包绕而成,并在绝缘表面包一层屏蔽层,然后装入一个由铝和不锈钢制成的内管中。硬导体一般由铜管制成,用绝缘支撑板固定在各芯单独的电磁屏蔽管内,然后再装入一个内管中。内管外面有外保护管,内管与保护管之间填有隔热材料。低温介质可以流过缆芯导体的中心孔以及缆芯与屏蔽管之间的空隙部分,然后经电缆外面的回流管返回到致冷装置。

**参考书目**

Weedy B.M. Underground Transmission of Electric Power. New York: John Wiley & sons, 1980  
Graneau P. Underground Power Transmission. New York: John Wiley & sons, 1979

(郑肇骥)

diya jiakong peidian xianlu

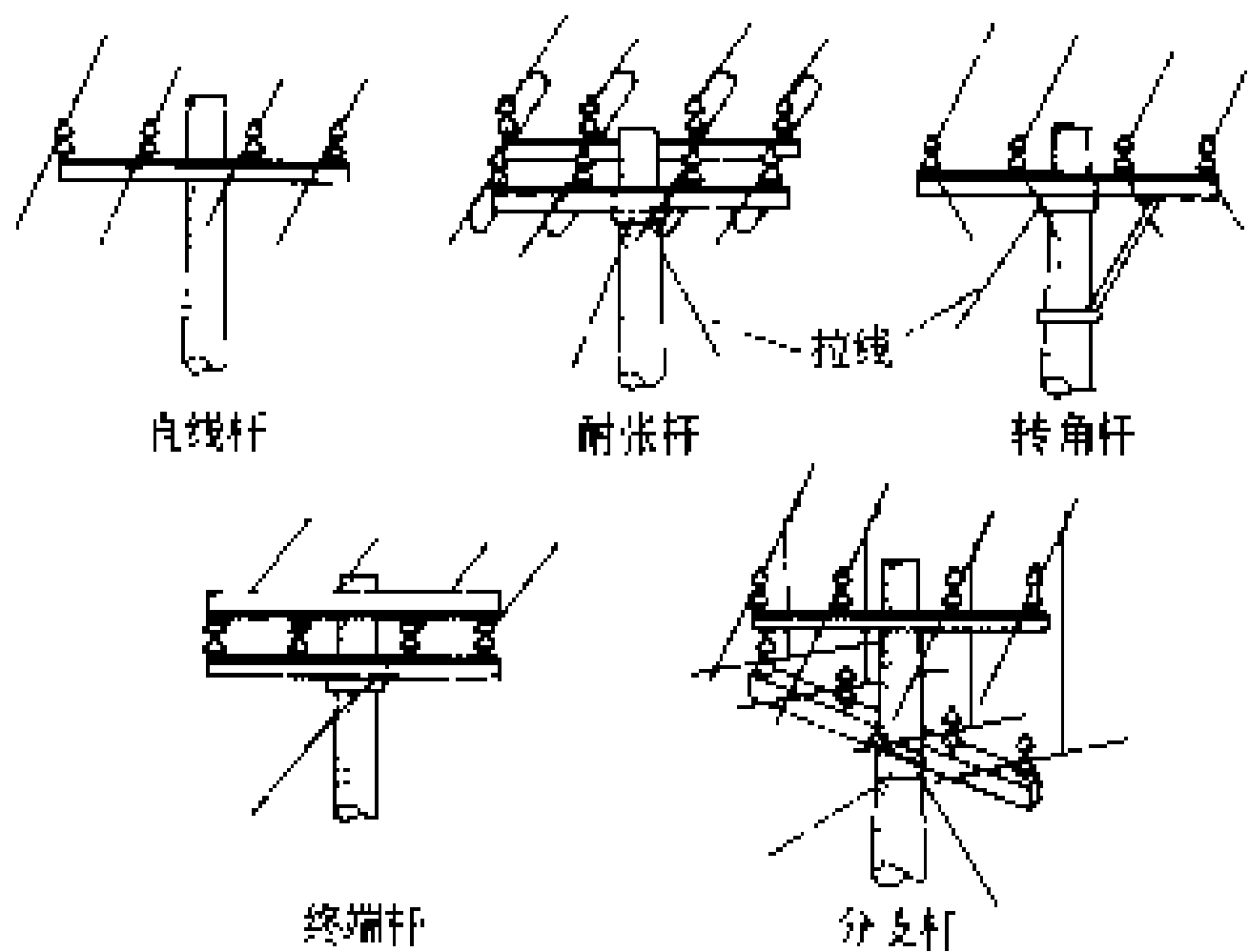
**低压架空配电线路** (low-voltage overhead distribution line)

电压为 1 kV 以下的架空配电线路,也称二次配电线路。它是直接供电给低压用电设备(如居民照明、生活用电、低压电动机和电热器等)的低压三相或单相线路。各国低压架空配电线路采用的电压与供电方式种类很多,例如美国有单相三线制的 120/240 V、三相四线制的 115/200 V、127/220 V、266/460 V 等,日本有单相三线制的 100/200 V、三相四线制的 115/200 V 等。中国的公用电网供电电压为单相 220 V、三相 380 V。

线路组成 低压架空配电线路由于要向大量低压用户供电,支接点很多,杆塔档距较小(一般在城市或

农村居民地区不超过 50 m), 有的还沿房屋屋檐或墙架设。交联聚乙烯绝缘导线或架空成束绝缘导线已在各国推广使用, 主要用于城市或近郊配电网中。绝缘导线的线芯有铝合金绞线、铜绞线和铝绞线等, 其中铝合金绞线有兼作承力线的作用, 而有的成束绝缘导线中间则用绝缘钢绞线作承力线。与绝缘导线相配合, 所使用的金具和连接件等也都是绝缘的, 例如绝缘耐张线夹、绝缘悬挂线夹、绝缘中间连接压接管和绝缘穿刺式支接接线夹等。其中绝缘穿刺式支接接线夹, 可以在不剥除绝缘层的情况下, 直接由穿刺齿刺入绝缘层与导电线芯实现有效接触, 以通过负载电流。由于采用了绝缘导线或成束绝缘导线, 相间距离和对地安全距离都可以大大缩小, 电杆的高度可以相应降低, 甚至直接敷设在房屋墙上, 而且降低了线路电抗, 对降低线路电压损失也是有利的。此外, 即使电杆折断时或导线意外坠地时, 仍能安全可靠地保障供电, 不致对人员发生触电伤亡事故。绝缘导线在穿过树木等林带时也不致造成线路故障。

中国从 1986 年开始推广使用绝缘导线或成束绝缘导线。导线的绝缘层有用交联聚乙烯绝缘的和聚氯乙烯耐候型绝缘的, 但以耐候型聚氯乙烯绝缘使用较多, 配套金具和附件也陆续开发生产。目前使用较多的仍是用裸导线架设的低压架空配电线路, 其导线有铝绞线、铜绞线、铝合金绞线, 有的还采用氯丁橡胶绝缘线等风雨线。绝缘子以选用蝶式和针式的较多, 也有用低压瓷横担的。电杆有木杆、钢筋混凝土杆、管状塑料杆等, 其中以钢筋混凝土电杆用得较多。各种常用低压配电线路的杆型如图所示。



各种低压架空配电线路杆型图

**主要特点** 配电网的用户中绝大部分是低压用户, 因此低压架空配电线路在一个供电地区内分布面最广, 与用户关系最为密切。无论城市、近郊或农村, 几乎随处都有低压架空配电线路, 几乎每根电杆上都有支接线。电杆上架设的导线有三相四线的, 也有单相二线的, 不少电杆上还附架有街道路灯照明用控制线。有时也将低压架空配电线路沿墙敷设。使用的导线很

多是绝缘导线或成束绝缘导线, 可以带电作业, 即使是用裸导线架设的也可以考虑带电作业。在三相四线制低压架空配电线路上, 对中性线还沿线在支接点、终端增设了重复接地, 以保证中性线的零电位和安全供电。在低压格式配电网中, 还在沿线分段处装设分段平衡熔丝。低压架空配电线路上一般不装设过电压保护设备, 而在用户进线处装设低压避雷器或保护间隙, 或将该处绝缘子铁脚接地。

**发展趋势** 在城市配电网中, 低压架空配电线路将逐步用电力电缆线路代替, 以美化城市, 提高供电可靠性。即使在不使用电缆供电的地区, 也推广使用成束架空绝缘导线沿墙敷设方式。在推广绝缘导线过程中, 为简化绝缘导线金具和连接件品种, 如法国规定了统一的中性线导线规格, 有些国家也正在研究之中。中国城市配电网的低压架空配电线路将逐步采用绝缘导线, 特别是推广应用成束架空绝缘导线。

(周德新)

diya peidianwang

**低压配电网** (low voltage distribution network)

由低压配电线路及其附属电气设备组成的向用户提供电能的配电网。低压配电网的功能是以中压配电变压器为电源, 将电能通过低压配电线路直接配送给用户。低压配电网的低压配电线路供电距离较近, 低压电源点较多, 一台中压配电变压器就可作为一个低压配电网的电源, 两个电源点之间的距离通常不超过数百米。低压配电线路供电容量不大, 但分布面广, 除少量集中用电的用户外, 大量是供给城乡居民生活用电及分散的街道照明用电等。

**电压等级** 低压配电网电压等级标准的确定是以人身安全为主, 但过低的电压标准, 公用的低压配电网又不能适用。各国公用低压配电网的额定电压标准不尽一致, 主要有单相 100 (110、127) /三相 200 (220) V 和单相 220 (230) /三相 380 (400) V 两类。低压配电网逐渐采用比较经济的三相四线制, 单相(照明、家用电器等)和三相(动力)混合系统。近年来, 某些国家对集中用电的大楼和工业用户有采用更高电压(如 416~460V)的趋势。在中国, 《全国供用电规则》规定采用单相 220/三相 380 V 的低压额定电压。有些国家也称低压配电电压为二次配电电压, 中国过去也曾如此称谓过。(见配电网)

**网络接线要求** 低压配电网负荷点多而分散, 一般情况下, 用电量较小, 负荷重要性较低, 停电后影响相对较小, 不一定配置备用电源。但对于负荷密度较高, 一旦停电将造成严重影响的地区, 除要求不停电作业外, 还要在接线上考虑减少检修造成停电的机会。

些经济发达国家的大城市中心区,对低压分散负荷都采用格式网络供电,而对于集中的较大负荷,采用点网式供电被认为是最好的方式。此外,从提高供电服务质量方面考虑,各国都统计并制定每年每户的平均停电时间(分/年)、平均停电次数(次/年)、每次事故所造成的停电规模(千瓦)等,作为考核低压配电网服务水平的指标,并进一步作为规划改进的依据。在中国,各地区供电部门已开始进行资料统计,但尚未对低压配电网供电可靠性制定出具体的标准。(见配电网接线)

(唐德光)

diqu brandiansuo

**地区变电所** (district substation) 向一个地区或大、中型城市供电的变电所。它通常从 110~220 kV 的电力网受电,降压至 6~35kV 后向电力负荷供电。地区变电所以受电为主,有些地区变电所就是终端变电所,因此高压电气主接线要尽量采用断路器较少的简易接线,例如桥形接线、单母线分段接线或双母线接线,低压电气接线通常采用单母线分段接线。为提高供电可靠性,当本地区内有若干变电所时,可以采用正常时分区供电、事故时互为备用的方式。

地区变电所靠近负荷中心,在负荷密集和供电可靠性要求较高的大、中城市中,当通信干扰和环境保护符合要求时,采用 110~220kV 高压直接深入市区的供电方式。当出现电力负荷较大的用户或有特殊要求的用户时,则从地区变电所引出专用线路向其供电,或另设专用变电所。

地区变电所要求有两个电源向它供电,这两个电源通常从区域变电所和地区发电厂引接,也可以从同一电源的不同母线段上引接。地区变电所内通常装设两台变压器,为避免事故时造成大面积停电,单台变压器的容量不能太大。地区变电所在运行初期只有一回电源线路和一台变压器时,则其低压侧需有联络线与本所以外的电源连接,这样当变压器停止运行时,可以由联络线继续向变电所所供的主要负荷供电。

为了保持运行电压水平,根据电力网调相调压计算,在地区变电所内可以采用有载调压变压器,也可以装设并联电容器。

(徐锡镛)

dixia brandiansuo

**地下变电所** (underground substation) 将主变压器、配电装置和主控制室等主要设施布置在地下的变电所。随着城市的发展,在城市中获得合适的变电所建设场地日益困难,同时输配电设施与城市建

设协调问题也日益受到重视,因此建设地下变电所成为解决上述问题的有效措施。地下变电所通常有三种:①属于电力网的地下变电所;②向地下铁道牵引供电的地下牵引变电所;③向宾馆和大型建筑物供电的地下用户变电所。

地下变电所的建设费用高于地上变电所。为降低建设费用,地下变电所的设施和布置常注重安全和紧凑,通常采用占地少的气体绝缘金属封闭电器、散热效率高且体积小的水冷变压器或干式变压器,进线和出线均采用地下电缆。地下变电所在防潮、通风、防火、防噪声、变压器起吊运输及其事故排油设施等方面,均有较高的要求。

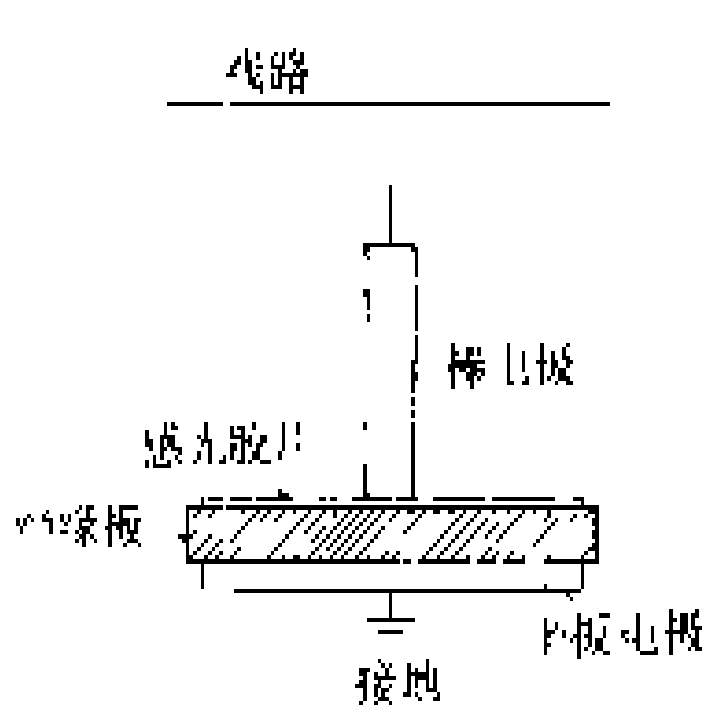
地下变电所需要不断供给新鲜空气并排出其内部的热量,为此需要设置有效的通风装置及其控制系统。变压器室、控制室和配电装置室内均需配备火灾探测报警系统和灭火设备,并需要考虑隔离措施。有的地下变电所工程采用钢罩封闭变压器的本体,其间充以二氧化碳气体,以防止变压器火灾事故的扩大。

为了加强变压器的冷却和散热,通常采用油—水—空气热交换器进行散热。热交换器中的油压高于水压,以防止水份渗入油内。在变压器的冷却散热系统中,则按照变压器运行温度、冷却介质进出口温度以及外部空气温度进行分级自动控制,此外,尚需设置相应的报警信号系统。

(赵正铨)

dianhuayi

**电花仪** (klydonograph recorder) 记录在过电压波作用下产生的电花图的装置。电花仪用来测量雷电过电压或内部过电压的幅值和极性。电花仪由棒电极、平板电极、电极间的绝缘板和感光胶片组成,如图所示。使用时棒电极接于线路,平板电极接地。当线路上出现过电压时,在棒电极尖端的周围将形成强电场区,使介质表面产生电晕放电,胶片将因放电形成的光子和电子撞击而感光,胶片经显影定影后即可得到电花图。



当棒电极为正极性时,电花图由相互间清楚分开的、带分支的通道组成;当棒电极为负极性时,电花图没有分支而呈片状。电压愈高电花图的直径愈大。由于正极性时放电易于发展,同一

电压下正极性电花图的直径要比负极性的大。所要测量的过电压的幅值和极性可根据电花图的大小和形状,利用预先作出的校正曲线

来决定。电花仪的测量误差约为±15%。

电花仪的工作电压一般为2~25 kV，当电花仪用来测量高压输电线路上的雷电过电压时，它的上电极接在导线上，下电极悬空，这样就形成一个分压器，其量程可通过下电极上的调节杆进行调整。

(雷经煌)

diangkangqi

**电抗器 (reactor)** 由于其电感而被电力系统作为限制短路电流、稳定电压、无功补偿和移相等使用的高压电器。按其绕组内有无主铁芯分为铁芯式电抗器和空芯式电抗器。按其用途不同又可分为限流电抗器、并联电抗器、消弧线圈、中性点电抗器、起动电抗器、滤波电抗器、阻波器、阻尼电抗器、平波电抗器、电炉电抗器和调节用电抗器等。长期以来，额定电压在35 kV以下的限流电抗器多制成混凝土柱式结构，并联电抗器则多为带气隙铁芯的油浸式结构。国际上的发展趋势是：额定电压为110 kV及以下的串联和并联电抗器，采用干式空芯玻璃纤维结构；超高压并联电抗器采用单相或三相油浸带气隙铁芯式结构。

图1为单相电抗器磁路的基本结构示意图。在相同绕组时，不同型式电抗器的电流( $i$ )与磁链( $\psi$ )的关系曲线如图2所示。

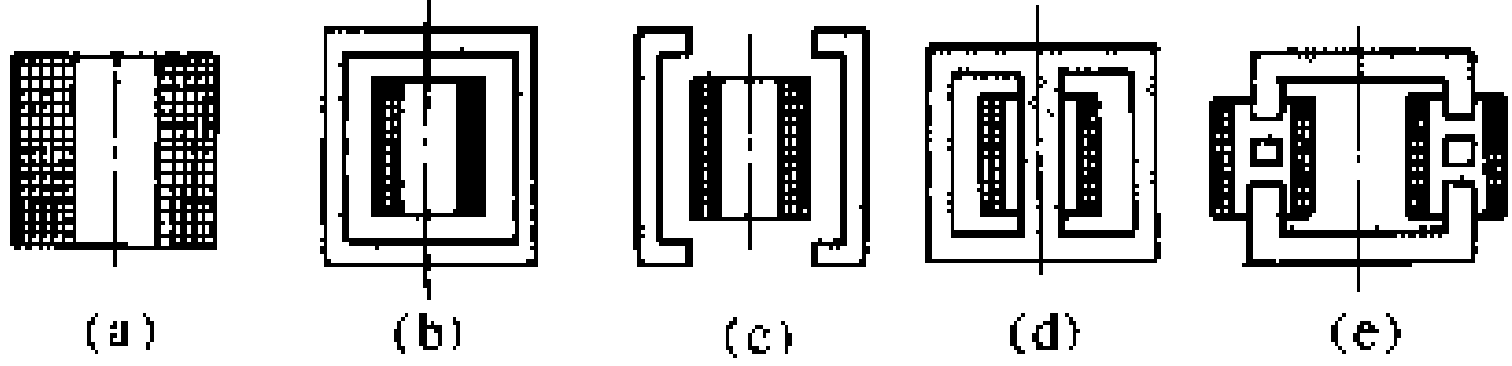


图1 单相电抗器的磁路基本结构

(a) 空芯式；(b) 带磁屏蔽的空芯式；(c) 带磁分路的空芯式；(d) 闭合铁芯式；(e) 带气隙的铁芯式

**空芯式电抗器** 只有一个空芯电感线圈而无铁芯的电抗器。有的空芯式电抗器带有磁屏蔽和磁分路。因为没有主铁芯，磁路的磁导较小，电感值也小，无饱和现象。额定电压在35 kV以下时，额定电流一般为200~3000 A，通常为户内干式混凝土柱式结构。额定电压在35 kV及以上者，通常为户外

油浸式，箱壁加装磁分路或磁屏蔽。为了防止振动和减少噪声，有些大型高压并联电抗器也采用磁屏蔽式空芯结构。空芯式电抗器制造工艺简单，振动和噪声小，

运行可靠，维护方便，广泛用作串联和并联电抗器以及滤波、阻波等各类电抗器。空芯式电抗器的缺点是磁通密度低，铜线用量较大。

**铁芯式电抗器** 绕组内装有主铁芯的电抗器。因铁芯的磁阻比空气的小，所以铁芯式电抗器的电感值通常较大，相同容量时体积也比空芯式的小。铁芯式电抗器还分闭合式和带气隙式。铁芯式电抗器广泛用作并联电抗器、消弧线圈和电炉电抗器等。

**限流电抗器** 串联在交流电路内用以限制电力系统短路电流的电抗器。它使后接设备的短路电流不超过容许值。在多台并联运行的变压器或多回并行输电线路的变电所，限流电抗器还可用来进行阻抗匹配。(见限流电抗器)

**并联电抗器** 并联连接在系统中用于补偿电容电流的电抗器。它可以降低系统的工频过电压和操作过电压，亦可单独使用或与并联电容器一起使用代替同步调相机，对电力系统进行调相和无功补偿。(见并联电抗器)

**消弧线圈** 用来补偿由于单相接地故障而产生的线对地容性电流的一种单相中性点接地的电抗器，又称消弧电抗器。消弧线圈通常用于非有效接地系统，接于变压器或发电机的中性点与地之间，以消除间歇电弧过电压。(见消弧线圈)

**中性点电抗器** 用于有效接地系统中接于变压器或并联电抗器的中性点与地之间的单相电抗器，又称中性点小电抗。中性点电抗器接于变压器中性点与地之间，可限制线路接地故障电流或异常过电压；接于并联电抗器中性点与地之间，可限制线路单相接地故障时的潜供电流和谐振过电压。(见中性点电抗器)

**起动电抗器** 与电动机串联，用以限制交流电动机起动电流的电抗器。

**滤波电抗器** 与并联电容器(组)串联使用，以抑制高次谐波电流和电容器组接通时的涌流的电抗器。滤波电抗器也可在整流电路中与负载串联，以滤除整流电压中的脉动成分，使负载电流接近于理想直流。(见换流站交流滤波装置)

**阻波器** 与输电线路串联使用，对某些特定的频率或频带提供阻波阻抗，为电力载波通信提供信号通道的电抗器。

**阻尼电抗器** 与电容器组串联使用，以限制断路器操作或系统干扰时的瞬间冲击电流的电抗器。

**平波电抗器** 串联在直流输电线路两端，以减少谐波电流和暂态过电流引起的脉动电流量的电抗器。(见平波电抗器)

**电炉电抗器** 串联连接在电炉变压器的高压侧，以限制电弧炉熔炼初期发生塌料造成电极短路时的短

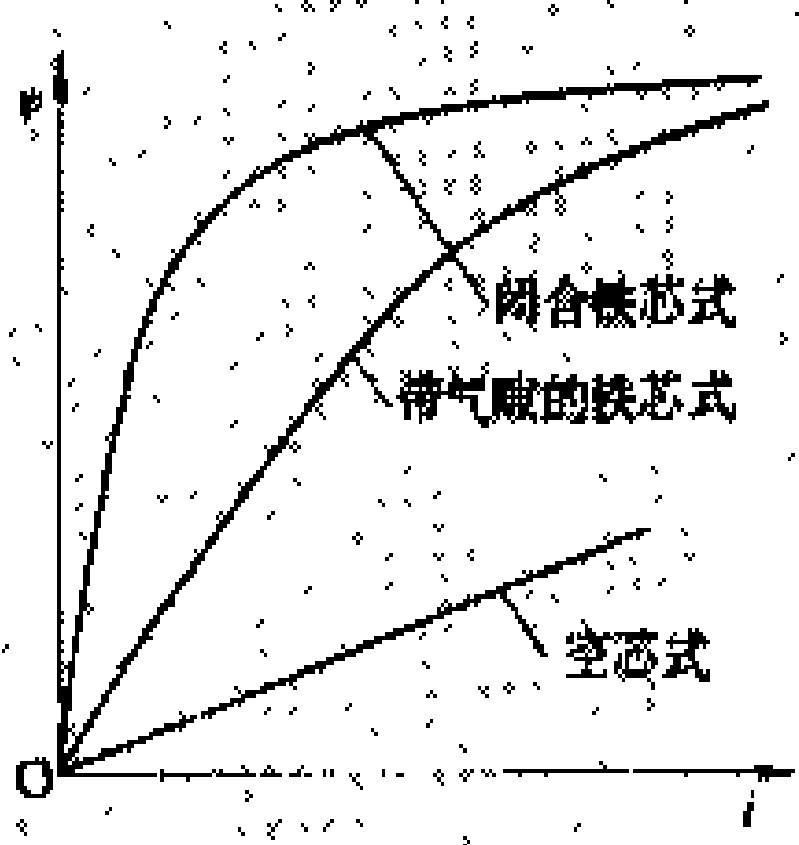


图2 各种电抗器的特性曲线

路电流的电抗器。

调节用电抗器 利用铁磁材料的饱和特性，以较小的直流功率来控制较大的交流负载的一种电抗器。调节用电抗器有饱和电抗器和自饱和电抗器两种。饱和电抗器与负载串联，用以调节负载的电流和功率；自饱和电抗器接在整流臂中与整流元件串联，用以平滑地调节整流装置直流输出电压。

(浦文宗)

diankangqi baohu

电抗器保护 (reactor protection) 反应电抗器故障和异常运行的继电保护。在电抗器出现故障或异常运行时，电抗器保护装置判断故障并动作于信号或跳闸，使电抗器免遭损坏，并减少对系统的影响。

连接于高压线路的油浸式并联电抗器的保护动作后，断开电抗器的断路器，若电抗器不设断路器则动作于线路断路器，并远方起动断开线路对侧的断路器。(见并联电抗器继电保护)

连接于变压器低压侧的电抗器，通常不设断路器，或仅设能供正常投切用的负荷开关，保护动作后断开上一级的断路器。

空芯干式绝缘电抗器运行中很少发生故障，因而不装设保护装置。

按油浸式线路并联电抗器的故障类型，并联电抗器的保护有：反应绕组的单相匝间短路或接地等内部故障的保护；反应套管式引出线的相间短路或单相接地等外部故障的保护。按电抗器的异常运行类型，电抗

器的保护有：反应电源电压升高引起过负荷的保护；反应油箱的油位降低，温度升高和冷却系统故障等的保护。此外，对绝缘油中溶解气体进行分析和判断，也起到对电抗器异常运行的监视和保护作用。

油浸式线路并联电抗器的保护主要有：瓦斯保护、差动保护、匝间短路保护、过电流保护、过负荷保护等。此外，并联电抗器的油浸式中性点电抗器也装设瓦斯保护、过电流保护和过负荷保护。反应油浸式电抗器的油位下降、温度升高和冷却系统故障的监视和保护的要求，与变压器的相同。(见并联电抗器继电保护、变压器保护)

(梁奕荣)

diankangqi shiyan

电抗器试验 (reactor tests) 根据有关技术标准，采用测试手段对电抗器的性能及质量状况的检验。电抗器产品的试验可分为出厂试验(也称例行试验)、型式试验和特殊试验。出厂试验是每台电抗器产品均须承受的试验。型式试验是对电抗器结构设计进行鉴定的试验，除全部出厂试验项目外，还增加一些技术条件规定的项目。特殊试验是除出厂试验和型式试验外，由制造厂与用户商定增加的试验项目。

电力系统中使用的电抗器种类很多，不同种类的电抗器试验项目差别很大。国际电工委员会(IEC)和世界上许多国家都制订有电抗器的试验标准。中国国家标准与 IEC 标准对电抗器试验项目的规定基本相同。表中列出了各种电抗器的试验项目。

电抗器的试验项目

项 目 \ 种 类	并联电抗器	直流电抗器和 中压点电抗器	限流电抗器	滤波电抗器或 谐波电抗器	接地变压器	消弧线圈	平波电抗器
绕组电阻测量	○	○	○	○	○	○	○
电 抗 测 量	○	○	○	○	○	○	○
损 耗 测 量	○	○		○	○	△	□
外施耐压试验	○	○	○	○	○	○	○
感应耐压试验	○	○	○	○	○	○	
雷电冲击试验	○	△	△	△	△	△	
操作冲击试验	○						
温 升 试 验	△	△	△	△	△	△	△
三相电抗器的零序阻抗试验	□				○		
三相电抗器的互电抗试验	□						
声 级 测 量	□	□			△		□
振 动 测 量	□						
电流谐波测量	□						

续表

	□					□	
		□	□		△		□
				○			
							□

注：○出厂试验；△型式试验；□特殊试验；\*测额定电压下的空载电流。

(王乃庆)

dianlan anzhuang  
**电缆安装** (cable installation) 依据电缆线路设计要求,将电缆自制造厂提运到施工地点,再按照工艺规定敷设安装直至能送电的工作。一般包括电缆的验收、运输、相应的土建工程、敷设电缆、连接电缆接头和电缆终端、测绘电缆线路竣工图、记录原始安装资料,直至电缆线路交接试验合格为止。

电缆安装是一项集合群体劳动,通常分成敷设、接头和试验三类工种,各司其职,并相互紧密配合。这需要一个管理系统,统一协调进度。此外,简化安装工序,降低劳动强度,开发机械化施工,也是各国电缆专业部门正在不断改进的工作,以力求降低安装费用,提高安装质量。

由于电缆敷设方式的不同,电缆安装过程和所使用机具的简繁程度有很大差别,更由于电缆的类型不同,如自容式充油电缆、钢管电缆等,使电缆安装工作更加复杂化。

电缆验收 常规的中低压电缆,只作电缆在盘上的外观检查,如电缆的两端密封是否完好,电缆外皮有无机械损伤等,同时检视产品质量保证书,各项指标是否达到要求。对高压电缆的验收,除了常规的检查外,须参与出厂抽样试验,电缆结构不属常规的产品,须参与型式试验。

电缆运输 电缆多数是绕在木盘或铁盘上用载重车、列车、货船运输,但是不论用那种运输工具,电缆盘都是竖直搬运,不宜侧卧运输,因为侧卧运输时,在底层的一圈电缆受到其上各圈电缆自重的压力,可能会超过电缆的允许侧压力,促使变形而损伤电缆绝缘。

既重又大的电缆盘,在短途运输时,常用低车架平板车;用列车运输时,用元宝车,每只盘边底下用木楔固定,以防重心过高倾倒和车辆突然减速或加速时,电缆盘惯性冲撞的危险。

特制整根长度的海底电缆,可以用筒装或自制造厂直接用敷设船圈装运输。

敷设方式 见电缆直埋敷设、电缆排管敷设、电缆沟敷设、电缆隧道敷设、电缆竖井敷设、海底电缆敷设。

安装机具 见电缆安装机具。

安装资料 安装电缆线路的文件。电缆线路一般属于隐蔽工程,并且使用时间较长,通常至少在30年以上,日后运行维护人员,可能几经更易,无法了解电缆线路全过程,因此原始安装记录,十分重要。安装资料包括电缆出厂检验记录、电缆线路设计书、管线施工执照、测绘竣工图纸以及电缆接头和电缆终端的安装详细记录,还包括竣工试验合格证明书。

交接试验 见电缆线路交接试验。

(史传卿)

dianlan anzhuang jiju  
**电缆安装机具** (cable installation equipments) 电缆线路敷设与接头安装施工中所需要的各种特殊机具的总称。用以减轻人体的劳动强度和保持电缆线路应有的工程质量。电缆安装机具具有电缆敷设机具和电缆接头机具两大类。

电缆敷设机具 将各种包装(如盘装、筒装和圈装)的电缆敷设成为电缆线路的机具。电缆敷设机具因敷设方法不同而异,通常有电缆盘千斤顶、电缆滚轮、电缆牵引端、防捻器、排管孔心棒和埋设机等。

电缆盘千斤顶 托起电缆盘的轴使电缆盘能在轴上旋转的支架,一般用钢结构作成,有蜗轮蜗杆式和液压式二种。

电缆滚轮 牵引电缆时防止电缆和地面摩擦而将电缆临时搁在可以自由转动滚轴上的工具。它不但减小了电缆牵引力,并且防止了电缆外护层表面的擦伤。同步驱动的电动滚轮还具有向牵引方向推动的功能。

防捻器 装在牵引钢丝绳和电缆牵引端之间的连接器,其两侧可相对旋转并有耐牵引的抗张强度,利用它消除牵引钢丝绳受张力后的退扭力和电缆自身的扭力。

排管孔心棒 俗称木牛,是在敷设排管电缆前用

以清除排管孔内沉积污泥杂屑的短段（约为 40cm）圆柱形工具。圆柱外径略小于排管孔内径，可以木制也有用钢管制成。钢制的心棒尚有削刮排管孔内壁毛刺的作用。施工中常以几个心棒反复使用。

**埋设机** 敷设海底电缆时，用多个高压水喷嘴冲去电缆周围泥土使电缆沉入泥土中的机器。埋设机有先敷后埋和边敷边埋二种。边敷边埋的埋设机通常自动化程度较高，结构较复杂，要求在工作时前后和左右平衡。

**电缆接头机具** 安装电缆时用以实现电缆导体连接、绝缘恢复和金属套连接的专用工具，用在电缆接头和电缆终端的制作。电缆接头机具因电缆的型式不同而有差异，但一般常用的有导体压接机具、绝缘剥切工具、绝缘绕包机、真空净油车和真空泵车等。

**导体压接机具** 用一只连接管套在二根被连接的电缆导体上，施加机械压力达到导体电气连接的工具。利用杠杆原理的导体压接机具称作压接钳；利用液压原理的导体压接机具称作油压钳。压接钳或油压钳的钳头都可根据电缆导体的大小更换压模。通常一套压接机具，备有可在压接范围内的各种导体规格的压模。

**绝缘绕包机** 一般指用在高压塑料电缆接头中恢复电缆绝缘层自动绕包带子的机器。所用自粘结橡胶包带在一定的张力下能自动硫化，使绕包的绝缘层成为整体。绕包机用在 220kV 电缆接头时，尚需配备能加热加压的模具，使带有交联剂的聚乙烯包带在高温高压下硫化成整体。对更高电压的电缆接头，在接头模具中压柱入伴有交联剂的聚乙烯粒子，在高温高压作用下，使聚乙烯粒子交联成绝缘整体，替代绝缘绕包机。

**绝缘剥切工具** 将塑料绝缘电缆的绝缘层切除或削成锥形而不损伤电缆导体的工具，用在电缆接头或电缆终端制作工艺中。

**真空净油车** 将充油电缆用的油在真空状态下过滤脱气的车式机械装置。脱气的电缆油，用以补充电缆接头或终端制作时流失的电缆油。真空净油过程包括电缆油的过滤，加压力后喷成微细油流，在真空罐中除气，达到要求后，用高压油泵注入压力箱等。有些真空净油车还备有循环油管系统，便于电缆油反复脱气。

**真空泵车** 便于携带并配有真空泵、真空玻璃罐和检视真空度仪表的车式机械装置。用于在高压电缆接头或终端制作完成时需要灌注绝缘油前排除接头内空气。

（史传卿）

dianlanceng fushe

**电缆层敷设** (cable corridor laying) 将

电缆敷设在建筑物的地下层或发电厂、变电所主控制室及屋内配电室下的电缆半层中的一种电缆安装方式。主要用在发电厂或进出电缆线路较多的大型变电所中。

电缆层比电缆隧道（见电缆隧道敷设）有更大空间，因此其电缆支架可以不依附于墙壁，而可按需要位置设立多层框架。框架四周及支架之间备有通道，便于施工和运行巡视。由于电缆层的电缆一般都在控制盘或配电装置下，电缆密集，纵横交叉，在设计及敷设时需妥当排列整齐，以免影响施工及巡视。此外，电缆分支箱、电缆接头或必要的电缆辅助设备都可纳入电缆层中。

设在地下的电缆层，容易积水，通常备有排水装置，如集水井等。设在 GIS（见气体绝缘金属封闭电器）下的电缆层因容易积聚 SF<sub>6</sub> 气体，故要求装有排气风扇。一般电缆层都采取良好的防火阻燃措施及消防设计，除了消防用具外，电缆外护层常涂防火涂料或绕包防火包带，堵塞各处电缆出入管孔等，也可采用阻燃电缆。

20 世纪 30 年代，地下电缆层已推广使用，其后为了节省变电所建筑物用地，将电气设备安装在多层建筑内的屋内变电所中的方式已被广泛采用，从而使电缆层敷设得到进一步发展。

（李霞娟）

dianlan daoti lianjie

**电缆导体连接** (cable conductor connection)

电缆接头中电缆导体与导体之间的连接以及电缆终端中导体与接线端子之间的连接。常用的方法有锡焊、压接、熔焊和机械连接四种。

**锡焊** 以熔化的焊锡填注在导体之间的一种工艺。这是对铜导体最老的连接方法，目前国内外还时有采用。以锡焊连接铜导体时，对 10kV 及以下电缆采用弱背式连接管，对 35 kV 电缆则采用有浇注孔的管状连接管。锡焊需要较熟练的技术才能避免在连接管内产生空隙。如焊接不良，则接头电阻增加，很可能使电缆接头发生故障。然而，只要能按正确的工艺进行操作，锡焊仍不失为一种较好的连接铜导体的方法。但锡焊的接头在短路故障时的允许温度仅为 120℃。

**压接** 以机械压力使导体间金属产生蠕变以实现相互连接的一种工艺。压接法广泛被采用，特别是对于 35 kV 及以下的铝芯电缆导体的连接更为有利。这是因为压接过程中压破了铝导体表面一层电阻较大的氧化铝，使导体间的金属铝直接接触，只要连接管、连接端子和压接模具设计正确，压接的质量就很稳定。但压接法不宜在交联聚乙烯电缆的模压接头中应用，因为



模压接头在硫化过程中所需的高温使压接接头的温度在较长一段时间内超过 135℃，于是铝导线发生蠕变而使压接接头的接触电阻增大，最终导致接头过热而烧坏。模压接头中的铝导体最好采用熔焊进行连接。

**熔焊** 用高温将导体间熔化连接的一种工艺。一般用于超高压输电电缆的接头，如铝芯充油电缆的导体一般均采用由惰性气体保护的熔焊方法连接。熔焊的主要优点是在不增加连接处导体直径的情况下，连接点仍可获得优良的导电性能。制作电缆软接头时，必须采用熔焊法连接导体。熔焊作业也需要熟练的技艺，焊接设备较贵，只是在对可靠性要求比较高的输电电缆线路上使用。

近年来，在铝芯交联聚乙烯电缆的模压接头中发展了一种铝热剂熔焊技术，也称药包焊。这种熔焊方法既简便，又不需要昂贵的焊接设备，适于在配电电缆上使用。

**机械连接** 以拧紧螺钉的压力使导体间电气接触的一种工艺。常用于 1kV 塑料电缆接头中的导体连接，其主要优点是可带电作业。机械连接器有各种各样的设计，其中最常见的是适用于实心铝导体能刺穿导体绝缘层的连接器，它既简化了连接工艺，又解决了带电连接的问题。这种连接器利用螺纹连接结构把被连接的导体夹紧在一起，其夹紧导体的部件具有锐利的齿面，在拧紧螺钉时能咬住导体表面，从而提供了良好的机械和导电性能。为了防止螺钉拧得过紧而损伤导体，一般用能施加固定力矩的特殊扳手拧紧螺钉，或使用断头保险螺钉。

与压接法一样，机械连接也不需要熟练的技艺和昂贵的工具。机械连接法原来只用于负荷电流较小的分支电缆接头，由于技术进步，也已在 1 kV 大截面多芯电缆的直线电缆接头中应用。但由于机械连接器的形状复杂，而使接头中的电场分布不均匀，所以还不能用于更高电压等级的电缆导体连接。

参考书目

McAllister D. Electric Cables Handbook. Granada Publishing Limited, 1982

(王焄明)

dianlan dianchang yingli

**电缆电场应力** (electric stresses of power cable) 电缆在运行中其绝缘介质内的电力线密度或单位距离的电位差。在电缆的绝缘介质内，任意一点的电场应力可用三维矢量表示：垂直于导电芯的电场应力称作辐向应力，平行于导电芯的电场应力称作轴向应力，第三维矢量是沿畸变电力线切向的电场应力分量称作切向应力。电缆电场应力是损坏电缆绝缘

介质的一个因素，而且电场应力的大小决定了电缆和其附件的结构尺寸，因此在设计电缆绝缘本体结构或其附件（如电缆接头、电缆终端）时，尽可能避免或减小电场应力。单芯电缆或屏蔽型电缆，因为导电芯和接地层是同芯结构，避免了切向应力。在各种电缆本体内，因为沿电缆轴向任意二点间的截面相同，因此不存在轴向应力。为此在设计高压电力电缆时，都采用屏蔽接地层，从而避免了切向和轴向应力。

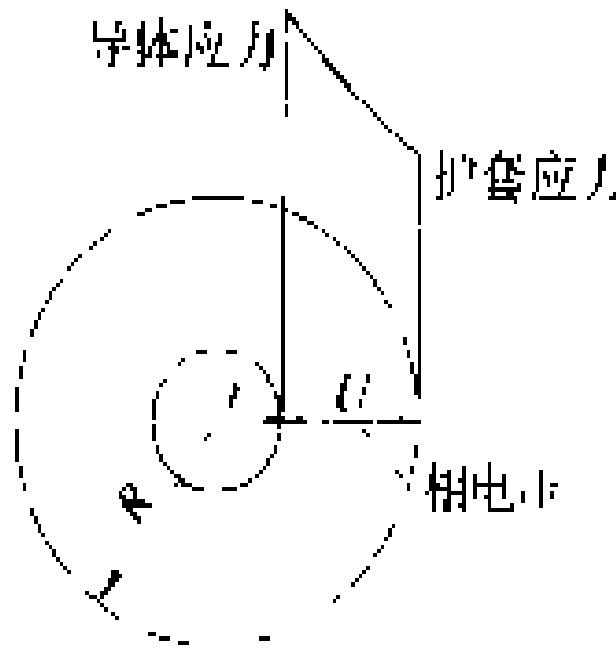
**辐向应力** 电缆电磁场中垂直于单位长度导电芯呈辐射状的电力线密度。在距离导电芯中心为  $x$  处的电力线密度为

$$D_x = \frac{Q}{2\pi x} \tag{1}$$

由此，在以导电芯中心为圆心半径为  $x$  处的电场应力为

$$E_x = \frac{Q}{2\pi x \epsilon_0 \epsilon_r} \tag{2}$$

式中  $D_x$  为距离导电芯中心为  $x$  (m) 处的电力线密度， $C/m^2$ ； $Q$  为单位长度 (m) 导电芯上的电荷， $C$ ； $E_x$  为距离导电芯中心为  $x$  (m) 处的电场应力， $MV/m$ ； $\epsilon_0$  为真空介电常数， $\epsilon_0=10^{-9}/(36\pi)$ ， $F/m$ ； $\epsilon_r$  为绝缘介质相对介电常数。由式 (1) 和式 (2)，并从图中所示的单芯圆形导电芯的电缆中，可推导出在半径为  $x$  处的电场辐向应力为



$$E_x = \frac{U}{x \ln(R/r)} \tag{3}$$

式中  $U$  为导电芯对接地层的相电压， $V$ ； $R$  为接地层的半径， $m$ ； $r$  为导电芯的半径， $m$ 。

将式 (3) 中的  $x$  移动至导电芯表面和接地层，可得辐向应力

$$E_r(\text{最大}) = \frac{U}{r \ln(R/r)} \quad \text{在导电芯表面} \tag{4}$$

$$E_R(\text{最小}) = \frac{U}{R \ln(R/r)} \quad \text{在接地层内表面} \tag{5}$$

在式 (4) 中，如已知  $U$ 、 $R$  值，则导电芯表面辐向应力的最小值，可将式 (4) 微分，并使  $dE_r/dr=0$ ，得出  $R/r=e$ ，即当  $r=R/e$  时，导电芯表面的电场辐向应力最小。

**切向应力** 当导电芯和接地层不是同芯时，电力线产生了畸变弯曲，电场应力沿畸变电力线的切向分量即称为切向应力。由于三相电压的交变性质，以及绝缘材料的不同介电常数，就很难绘出精确的典型电力线分布图。可以判定，非直线辐射形的电力线是产生切

向应力的来源，而油浸纸绝缘电缆介质的切向击穿强度，仅是辐向强度的 1/10 至 1/20，因此在高压油纸绝缘电缆中，均采用了单芯或屏蔽型电缆，以避免切向应力。

**轴向应力** 在电缆接头或电缆终端内，即使是单芯或屏蔽型电缆，由于接地屏蔽层的半径比电缆本体的半径大或增绕绝缘材料的介电常数不同，使电力线发生了畸变，此时电场应力沿导电芯的轴向分量即称为轴向应力。油纸绝缘的轴向击穿强度和切向击穿强度相同，只是辐向强度的 1/10 至 1/20，因此轴向应力也是设计电缆接头和终端的一个重要参数，通常由轴向应力决定电缆接头的长度尺寸。

参考书目

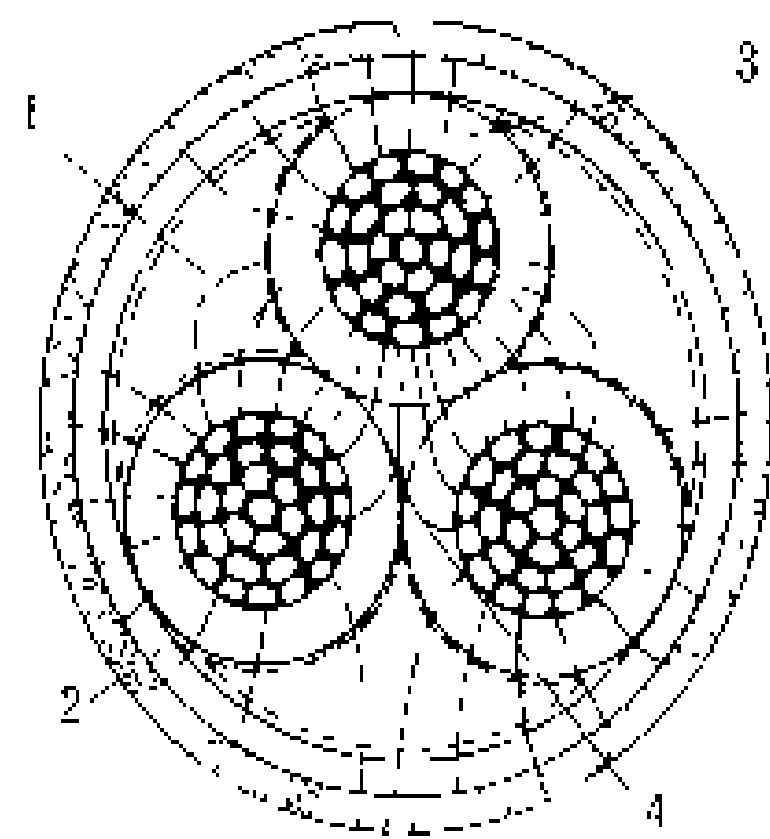
Bungay E M G, McAllister D. Electric Cables Handbook. BSP Professional Books, 1990

(陆德纶)

dianlan diancichang

**电缆电磁场** (electric and magnetic field of power cable) 电力电缆的导体通过电流或加上电压后在其周围产生的电场和磁场。电缆电磁场虽不能直接观察到，但可通过各种仪器仪表证明它的实际存在。

**电场** 可由电力线的分布形象地表示。电缆电场的电力线垂直始于导体表面，终于接地体和电流回归导体表面。由于各接地体和回归导体的几何形状不同，电力线的分布也就不相同。当电缆的导体和接地的金属套为同心圆时，如单芯电缆，其电力线就呈辐射状直线；当为非同心圆时，如带绝缘电缆，电场就发生畸变，其电力线为不同形状的曲线，如图所示。



带绝缘电缆电场畸变示意图

1—填料；2—带绝缘；3—芯绝缘；4—电力线切向分量

**磁场** 电流流过电力电缆的导体在其周围必然产生磁场。由于反向的导体电流形成反向的磁场，因此电缆内或邻近任一点的磁场是各个导体电流所产生的磁场的向量和。又由于交流电缆通过的电流是交变的，因此其磁场也是交变的。电缆的交变磁场在邻近导体（如通信线路、金属管道等）上会产生感应电压，这种感应电压是邻近导体中干扰电压的来源之一。

电缆与架空线相比，特点之一是电缆外皮一般都有一层接地的金属层，因此电缆的表皮外，一般不存在

电力线，即电力线只存在于导电芯和接地层的绝缘介质内，电缆的外面，不存在电场和容性耦合（见输电线路容性耦合影响）。此外，架空线的相间距离与电缆导电芯间的距离相比，要大 30~200 倍，因此电缆对邻近导体的磁场影响要比架空线的小得多。又由于电缆的表面，常有磁性材料作成的钢带或钢丝铠装，起到去磁作用，使得电缆周围的磁场强度和架空线的相比微不足道。

研究电缆的电磁场，是为了设计合理的电缆及其附件的结构，并为设计电力电缆线路时提供各种措施的依据，验算是否符合电磁兼容的要求。

(陆德纶)

dianlan dianci pingbi

**电缆电磁屏蔽** (cable screening; cable shielding)

电力电缆的电屏蔽与磁屏蔽的统称。改善电缆绝缘内电力线分布的措施称为电屏蔽。减少电缆磁场对外界影响的措施称为磁屏蔽。

**电屏蔽** 电缆内的电屏蔽分为导体屏蔽和绝缘屏蔽二种。

**导体屏蔽** 也称作内屏蔽。紧靠电缆的导电线芯上包一层电阻率很低的薄层，如炭黑纸、炭黑布带、半导电挤压层或金属化纸等，以降低由于绞线表面凹凸不平所形成的局部集中场强，使导电芯表面光滑均匀，电力线密度分布整齐，达到提高电缆绝缘水平的要求。

**绝缘屏蔽** 也称作外屏蔽。贴靠电缆线芯绝缘层外面，包一层电阻率很低的薄层，如炭黑纸、炭黑布带、半导电挤压层或金属化纸、薄金属带等。这些金属带和接地金属套之间有电气连接，因此外屏蔽处于地电位。在外屏蔽之外，不再存在电力线，即没有电场。因为外屏蔽和电缆绝缘层紧密相接，避免了绝缘层和接地金属套之间气隙或油隙的绝缘强度较低的影响，从而达到提高电缆绝缘水平的要求。

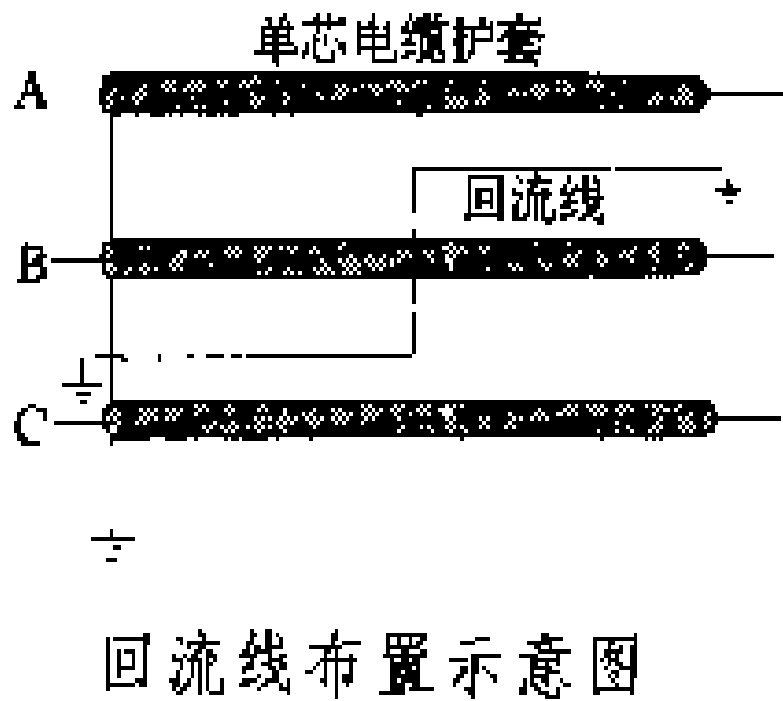
**磁屏蔽** 电力电缆的磁屏蔽通常有使用磁性材料、逆向磁通回流线和电缆换位等几种措施。

**磁性材料** 将三相电缆纳入钢管中（如钢管电缆）或将三芯电缆予以铠装（如钢带、钢丝），钢管、铠装等都是磁性材料，能集纳较多的磁力线，从而减少电缆磁场对外界的影响。磁性材料能集纳的磁通量决定于材料的厚度和磁导率。厚度大或磁导率高的磁性材料可以起到更好的磁屏蔽效果，但是磁性材料由于磁通密集，造成磁滞损耗，也会影响电缆的输送容量。此外，在传输大电流时，磁性材料达到磁饱和后，电缆磁场对外界仍会有所影响。

**逆向磁通** 当导体内有电流时，三根单芯电缆的

金属套如铅包或铝包都有感应电压产生，如将三相金属套在线路两侧相互联接（简称实联），则金属套内的感应电压短路，产生了与导体中电流方向相反的循环电流，从而在电缆内产生了一个近于逆向的磁通。逆向电流的相量决定于金属套的阻抗，虽然它并不与导体中的电流成 $180^\circ$ 差角，但基本上接近于 $180^\circ$ ，因此可削减对外界的磁通总和，即起到良好的磁屏蔽效果。通过分析计算可以得出如下结论：三芯电缆自身已有良好的磁屏蔽，不存在引起足以影响外界的磁通量。

**回流线** 三根单芯电缆的金属套如未能在电缆线路两侧互联，只在电缆线路上一点接地（如单点互联），此时为了防止单相接地故障电流形成的磁场对外界的严重影响，可沿电缆线路的间距内敷设一根阻抗很低的接地线，该接地线称为回流线。图示为回流线布置示意图。当电缆线芯通过接地故障电流时，回流线上有感应电压产生，因为回流线在其两端接地，感应电压转变为以大地为回路的逆向接地电流，抵消了大部分故障电流的磁通，从而能起到较好的磁屏蔽效果。



**电缆换位** 三相单芯电缆在线路长度的 $1/3$ 处轮流更换其相对位置，可使其对外界受磁通感应而形成的合成电压为零。电缆换位的原理相似于电缆金属套的交叉互联（见绝缘电缆接头），虽然更换电缆相对位置并不产生逆向磁通，但由各相磁通所感应的各相电压相互抵消，从而起到磁屏蔽的效果。

参考书目

郑肇骥，王焜明主编．高压电缆线路．北京：水利电力出版社，1983

（陆德线）

dianlan fanghuo

**电缆防火** (cable fire protection) 电缆线路由于外部失火或内部故障引起火灾事故，引燃电缆后防止火灾蔓延的措施。电力电缆的绝缘层和护层，含有大量碳氢化合物材料，容易燃烧。电缆防火常从四个方面着手：①用阻燃材料作电缆绝缘或护层，如耐火电缆、阻燃电缆；②采取隔断火苗的措施，如防火涂料、防火槽；③限制火灾范围，防止火焰扩大，如防火墙、封堵泥；④采取报警和灭火装置及时扑灭火灾，如烟雾报警系统、自动消防设施等。电缆防火已经积累了较丰富的经验，采用了不断改进的措施，现仍以降低措施费用和简化装置为主。

**耐火电缆** 在火焰高温作用下，在一定时间内仍

能维持通电能力的一种电力电缆。具体的耐火温度和时间各个标准规定不一，如IEC331标准规定为 $750^\circ\text{C}$ 、3 h，中国为1.5 h。耐火电缆主要用于消防水泵动力电源回路或感温、感烟、水喷雾灭火报警回路等低压回路。耐火电缆又分外层耐火电缆、内层耐火电缆和绝缘耐火电缆三种。

**外层耐火电缆** 用玻璃纤维带加防火涂料或膨胀型耐火包带等包在常规电缆的外面再加一层保护带的耐火电缆。它的优点是保持了电缆绝缘介质性能不变，缺点是增加了外护层的热阻，降低了电缆的输送容量。

**内层耐火电缆** 用云母玻璃丝带绕包在导体上的一种耐火电缆。它的优点是不影响其输送容量，缺点是导体上的耐火层可能出现空隙，容易诱发聚乙烯或交联聚乙烯绝缘内的树枝放电。

**绝缘耐火电缆** 又称矿物绝缘电缆，简称MI电缆，是用氧化镁材料作为电缆绝缘的耐火电缆。它的优点是氧化镁材料能耐受的高温可达 $2800^\circ\text{C}$ ，远高于一般燃烧温度，缺点是绝缘层容易受潮，需有金属护套和密封良好的电缆终端。

**阻燃电缆** 又称难燃电缆，在电缆护层火焰燃烧后仅延燃有限距离而能自熄的一种电力电缆。常用在易受外部影响着火的电缆密集场所或可能因着火延燃酿成严重事故的低压电缆线路，如通向控制室、继电保护室的电缆隧道或电缆层等。阻燃电缆护层着火后的延燃距离决定于护层的可燃性、温度和周围环境的含氧量，三者因安装场所不同，变化出入较大。衡量电缆的阻燃程度，以延燃距离来确定。设计阻燃电缆选用材料的氧指数大于 $28\%\sim 33\%$ 才具有阻燃性能，氧指数在 $40\%\sim 50\%$ 时具有高阻燃性能。

将一定数量的试样，放在特制的容器中，由完全充满氮气状态开始，用规定的点火方式，逐步调节输入氧气的含量，使刚能将容器内试样平稳燃烧时的氧气含量与其和氮气重量总和之比称为氧指数。试样点燃时需要的氧气含量越大，氧指数越高，也就是阻燃性越好。

**低盐酸高阻燃电缆** 用改性的聚合物（如聚氯乙烯、氯丁橡胶）作护层的电缆在燃烧时释放出氯化氢有害气体的含量远低于用普通聚合物作护层时的含量的高阻燃电缆。燃烧中产生的氯化氢气体不但容易腐蚀邻近金属部件，且对人体有危害，阻碍消防人员灭火，这是发展低盐酸高阻燃电缆的基本原因。

**低烟无卤阻燃电缆** 电缆在燃烧中不释放出卤化物的有害气体（如氯化氢等）同时也没有浓烟的阻燃电缆，又称无污染电缆。

**隔断火苗** 将普通电缆护层和周围空气相隔离的措施，如将电缆直接埋设在地下，敷设在排管内或穿入



金属管中,也有用装设防火槽、绕包防火带、或涂刷防火涂料等较为灵活的方式。这种措施主要用于非阻燃和非耐火电缆。

**防火槽** 设置在电缆周围的封闭式槽盒。槽盒有用钢板弯制而成,内垫隔热衬块(如硅酸钙板),也有用玻璃纤维增强塑料制成,氧指数在40%~50%之间。即使电缆着火,槽内空气有限,也不易延燃。如氧指数较低的槽盒,则在槽内填注黄砂,缺点是增加了槽盒重量,并降低了电缆输送容量。如果槽盒外部起火,由于槽盒难燃,不致引燃槽内电缆。

**防火带** 用氧指数较高的阻燃材料制成的绕包在电缆护层上的带子。通常用于电缆线路转弯处或重点防火区段。它的优点是操作比较简便,绕包厚度便于调整。

**防火涂料** 用特殊配制的阻燃材料喷涂或漆刷在电缆护层上的涂料。防火涂料有膨胀发泡型和非膨胀发泡型两种。膨胀发泡型的优点是在火焰高温下,涂层的厚度可以膨胀很多倍,因此起到良好的隔热作用,而在常温时厚度仅为0.6~1 mm,不影响电缆的散热性能,从而不降低电缆的输送容量。膨胀发泡型涂料有取代非膨胀发泡型涂料的趋势。

**限制火灾范围** 将已经发生的火灾限制在一定区段内的措施,如增设防火墙、填补电缆穿越楼板孔洞的封堵泥。

**防火墙** 在通畅的电缆廊道中设置的带防火门的夹墙,使廊道隔离成几个区段,缩小燃烧范围。它的缺点是不利于廊道的通风,且不利于检修电缆。

**封堵泥** 用以堵没电缆穿越楼板或夹墙孔洞周围空隙的填充物。有用软性耐火纤维填充,表面刷以砂浆水泥,有用腻子型(油泥状)防火堵料填充,也有先用软性耐火纤维填充,再用封堵泥塞平。玻璃纤维、石棉、矿渣棉等都属软性耐火纤维材料。腻子型封堵泥的特点是常温时始终柔软并有粘附力,在火焰高温时呈硬化状态。

**报警消防系统** 发生火灾前监视烟雾或温度并报警、发生火灾后可自动扑灭火焰的装置。它既可以联动操作,也可以部分手动操作。报警系统常用的有烟雾传感报警系统、局部温差传感报警系统。消防系统是在电缆失火后能喷射水雾或启动四氯化碳、泡沫灭火机的装置。从多年消防经验中看出,水喷雾装置灭火效果最好,因此采用较多,但要保证水柱压力和动力源的可靠性。

(屠俊良)

dianlan fanghuocao

**电缆防火槽** (cable fireprotection slot)

见电缆防火。

dianlan fanghuodai

**电缆防火带** (cable fireprotection band)

见电缆防火。

dianlan fenzhixiang

**电缆分支箱** (cable feeder pillar) 能容纳

并连接几个户内电缆终端的封闭的箱子。它的用途和分支电缆接头相似,可从一条电缆线路同时送电到几个场所,通常用在10 kV及以下的配电网中。它的优点是任一支电缆发生故障时,可在分支箱内拆断故障的电缆分支,在较短时间内恢复其它电缆分支的供电。因装设场所和功能不尽相同,电缆分支箱可分为户内式、户外式和插接式三种。电缆分支箱是和分支电缆接头同时发展的,由于其优点较多,逐渐淘汰了分支电缆接头,并且不断朝多功能方向发展,如装有熔丝的分支箱、用热缩管绝缘的小母线等。

**户内式** 户内分支箱是将几个电缆终端紧靠在一起,固定在支架上,各相电缆芯的引出线直接用螺栓连接后绕包绝缘带,四周加盖钢板而成。因为一般房屋有较好的通风条件,户内分支箱不需采取预防凝结水的措施。

**户外式** 户外分支箱的内部结构和户内分支箱相同,但需按装设场所不同,采用耐气候环境的箱壳,如设在人行道边,常用带门的铸铁耐锈箱壳,设在庭院中时,常用轻型钢板框架做成。为了防止凝结水的形成,箱内地面用沥青铺平,并开设通风出入口。

**插接式** 插接式分支箱内全部采用直角电缆终端,用带有环氧树脂浇铸套管制作的绝缘小母线作为插接式的插座,便于带电投切分支电缆线路。插接式分支箱的特点是采用固体挤压聚合电缆,便于和直角电缆终端同时移动。这种电缆分支箱也具有电缆刀闸的功能。

(屠俊良)

dianlan fushe jisuan

**电缆敷设计算** (cable laying calculation)

计算在敷设电缆时作用在电缆上的各种机械力,以便考虑是否有必要采取特殊措施,防止作用在电缆上的机械力超过允许值;或者按照电缆结构最大允许机械力确定被牵引电缆的最大长度和最小弯曲半径;以及敷设充油电缆时计算压力箱的最低允许压力。机械力分牵引力、侧压力和扭力三种。

**牵引力** 作用在电缆被牵引方向的拉力,主要作用在电缆的金属导体上,部分作用在金属套或铠装上。

但垂直方向敷设的电缆（如竖井电缆和海底电缆），其牵引力主要作用在铠装上。

牵引力的计算方法 各种典型情况下端头牵引时牵引力的计算公式列于表1。在表1各式中， $T$ 为牵引力，N； $T_1$ 为弯曲前的牵引力，N； $T_2$ 为弯曲后的牵引力，N； $\mu$ 为摩擦系数，见表2； $W$ 为电缆单位长度的质量，kg/m； $L$ 为电缆长度，m； $\theta_1$ 为直线倾斜牵引时的倾角，rad； $\theta$ 为弯曲部分的圆心角，rad； $\alpha$ 为弯曲平面的倾角，rad； $R$ 为电缆的弯曲半径，m。

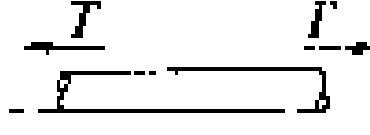
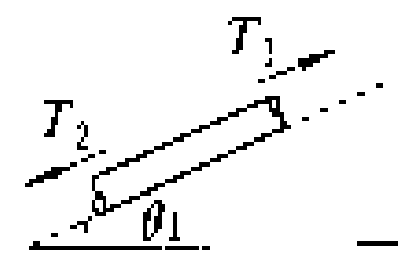
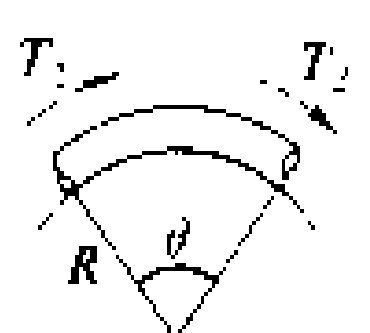
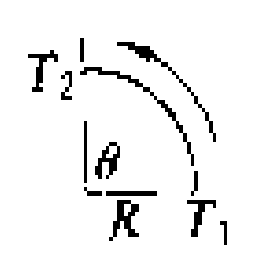
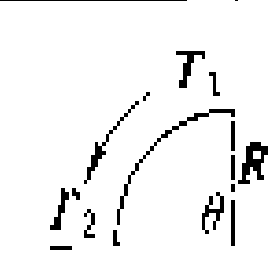
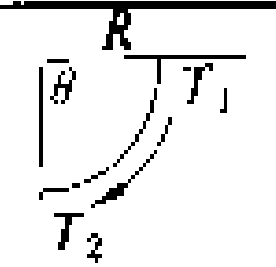
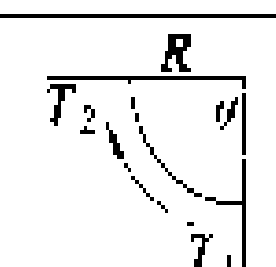
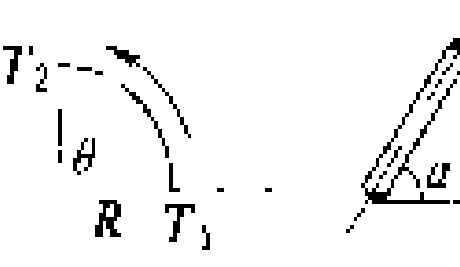
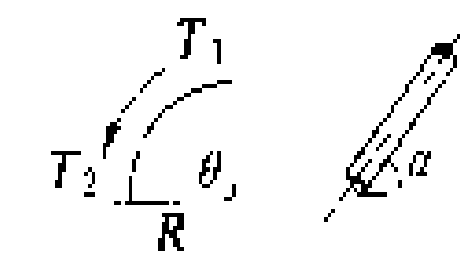
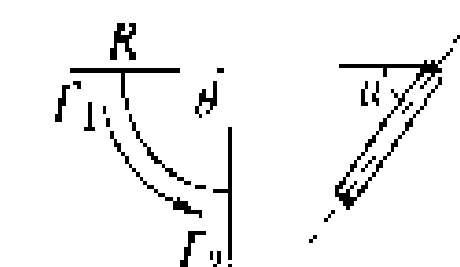

摩擦系数 电缆在各种不同物体上牵引时的摩擦

系数参考值列于表2。

在计算作用在电缆上的牵引力时还要考虑克服电缆盘旋转时产生的摩擦力。该摩擦力可近似地认为相当于15m长电缆的重力。

重量增加系数 将钢管电缆的三个缆芯拉入钢管时所需的牵引力由于受钢管内径的约束，要比没有钢管时的大。这种情况可等效地视为电缆重量的增加，并以重量增加系数表示。因此，在按表1计算钢管电缆所受的牵引力或侧压力时，必须乘以表3中所列的重量增加系数。

表1 端头牵引时牵引力计算公式一览表

弯曲种类		示意图	牵 引 力 (N)
水平直线牵引			$T=9.8\mu WL$
倾斜直线牵引			$T_1=9.8WL(\mu\cos\theta_1+\sin\theta_1)$ $T_2=9.8WL(\mu\cos\theta_1-\sin\theta_1)$
水平弯曲牵引			布勒公式： $T_2=9.8WR\text{sh}(\mu\theta+\text{arsh}[T_1/(9.8WR)])$ 李芬堡公式： $T_2=T_1\text{ch}(\mu\theta)+\sqrt{T_1^2+(9.8WR)^2}\text{sh}(\mu\theta)$ 尤拉公式： $T_2=T_1e^{\mu\theta}$
垂直弯曲牵引	凸曲面		$T_2=[9.8WR/(1+\mu^2)][(1-\mu^2)\sin\theta+2\mu(e^{\mu\theta}-\cos\theta)]+T_1e^{\mu\theta}$ 当 $\theta=\pi/2$ 时， $T_2=[9.8WR/(1+\mu^2)][(1-\mu^2)+2\mu e^{\mu\pi/2}]+T_1e^{\mu\pi/2}$
			$T_2=[9.8WR/(1+\mu^2)][2\mu\sin\theta-(1-\mu^2)(e^{\mu\theta}-\cos\theta)]+T_1e^{\mu\theta}$ 当 $\theta=\pi/2$ 时， $T_2=[9.8WR/(1+\mu^2)][2\mu-(1-\mu^2)e^{\mu\pi/2}]+T_1e^{\mu\pi/2}$
	凹曲面		$T_2=T_1e^{\mu\theta}-[9.8WR/(1+\mu^2)][(1-\mu^2)\sin\theta+2\mu(e^{\mu\theta}-\cos\theta)]$ 当 $\theta=\pi/2$ 时， $T_2=T_1e^{\mu\pi/2}-[9.8WR/(1+\mu^2)][(1-\mu^2)+2\mu e^{\mu\pi/2}]$
			$T_2=T_1e^{\mu\theta}-[9.8WR/(1+\mu^2)][2\mu\sin\theta-(1-\mu^2)(e^{\mu\theta}-\cos\theta)]$ 当 $\theta=\pi/2$ 时， $T_2=T_1e^{\mu\pi/2}-[9.8WR/(1+\mu^2)][2\mu-(1-\mu^2)e^{\mu\pi/2}]$
倾斜面上垂直牵引	凸曲面		$T_2=T_1e^{\mu\theta}+[9.8WR\sin\alpha/(1+\mu^2)][(1-\mu^2)\sin\theta+2\mu(e^{\mu\theta}-\cos\theta)]$
			$T_2=T_1e^{\mu\theta}+[9.8WR\sin\alpha/(1+\mu^2)][(1-\mu^2)(\cos\theta-e^{\mu\theta})-2\mu\sin\theta]$
	凹曲面		$T_2=T_1e^{\mu\theta}+[9.8WR\sin\alpha/(1+\mu^2)][-(1-\mu^2)\sin\theta+2\mu(\cos\theta-e^{\mu\theta})]$
			$T_2=T_1e^{\mu\theta}-[9.8WR\sin\alpha/(1+\mu^2)][(1+\mu^2)(\cos\theta-e^{\mu\theta})+2\mu\sin\theta]$



电缆的允许牵引力 通常取电缆受力部分材料抗

表 2 电缆在各种不同物体上牵引时的摩擦系数

接 触 面	摩擦系数
钢 管	0.17~0.19
塑 料 管	0.4
混凝土管, 无润滑剂	0.5~0.7
混凝土管, 有润滑剂	0.3~0.4
混凝土管, 管内有水	0.2~0.4
滚 轮	0.1~0.2
砂	1.5~3.5

张强度的 1/4 左右作为最大允许牵引应力, 再乘以受力面积即为最大允许牵引力。

在电缆导体受力时, 铜导体的最大允许牵引应力为 70 MPa, 铝导体的为 40 MPa。对于具有

中心油道的自容式充油电缆的导体, 其允许牵引力除了按其允许牵引应力和截面计算外, 还要求导体在牵引力作用下其油道不能发生永久变形。不论导体截面的大小, 不会使油道产生永久变形的最大牵引力为 27 kN。因此必须取两者中的小者作为最大允许牵引力。

用网套牵引无金属套的塑料电缆时, 牵引力作用在外护套和绝缘层上。聚氯乙烯的牵引应力为 7 MPa, 交联聚乙烯的为 6 MPa, 聚乙烯的为 4 MPa。由于外护套(一般为聚氯乙烯)的截面与绝缘层截面之比较大, 此外, 塑料不如金属材料那样容易产生永久变形, 因此对塑料电缆也有全部采用 7 MPa 作为牵引应力。

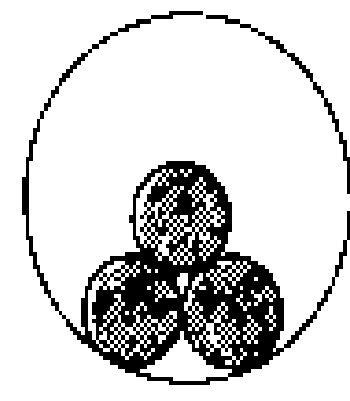
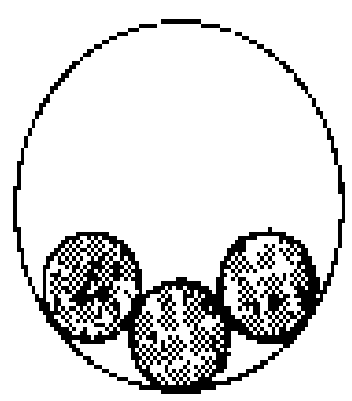
当用网套牵引自容式充油电缆时, 牵引力全部集中在金属套上。对于有加强层的铅套, 其最大允许应力为 10 MPa。波纹铝套为不使波纹变形, 其最大允许牵引应力限制为 20 MPa。对中低压油纸绝缘电缆, 由于其铅套较薄而且又无加强层, 故不宜只牵引铅套, 而应牵引其导体。

**侧压力** 垂直作用在电缆导体上的压力。侧压力主要发生在牵引电缆时的弯曲部分, 如电缆线路在转角处的滚轮、弧形滑板或敷设海底电缆时的入水槽处。盘装电缆横置平放或用筒装或圈装的电缆均存在侧压力。

**侧压力的计算方法** 将钢管电缆的缆芯拉入钢管时, 在弯曲部分的侧压力以及牵引其它电缆时在弯曲部分的侧压力的计算公式列于表 4。在表 4 各式中,  $P$  为侧压力, N/m;  $T$  为牵引力, N;  $R$  为弯曲半径, m;  $K_1$  为钢管电缆缆芯呈三角形时重量增加系数, 见表 3;  $K_2$  为钢管电缆缆芯呈摇篮形时的重量增加系数, 见表 3。

**电缆的允许侧压力** 钢管电缆缆芯的允许侧压力为 7 kN/m。对具有塑料外护套的电缆, 为避免压伤塑料外护套, 其允许侧压力一律限制为 3 kN/m。有钢丝铠装的电缆, 其允许侧压力由电缆制造厂提供。

表 3 重量增加系数的计算公式

排列形式		
	三角形	摇篮形
重量增加系数	$K_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D-d}\right)^2}}$	$K_2 = 1 + \frac{4}{3} \left(\frac{d}{D-d}\right)^2$

注:  $D$ —排管内径;  $d$ —电缆外径。

表 4 侧压力计算公式

电 缆 种 类	计 算 公 式
钢管电缆 (一管三根)	缆芯三角形排列时, $P = \frac{TK_1}{2R}$
	缆芯摇篮形排列时, $P = \frac{(3K_2-2) T}{3R}$
其他电缆	$P = \frac{T}{R}$

**扭力** 电缆由直线状态转变为圈形状态时或者由圈形状态转变为直线状态时产生的旋转机械力的总称。扭力又分为扭转力和退扭力两种。虽然两者相等, 但都很难计算。

**扭转力** 直线状态的电缆转变为圈形状态时产生的旋转机械力。如海底电缆制成后进行圈装时即产生扭转力。按圈装时盘绕的方向(顺时针或逆时针)和钢丝铠装的绕向(左向或右向), 扭转力可以捻紧钢丝或者松开钢丝使之成鸟笼状。

**退扭力** 圈形状态的电缆转变为直线状态时释放储存的扭转力能面产生的旋转机械力。如圈装的海底电缆进行敷设时即产生退扭力。如敷设海底电缆时作用在电缆上的张力小于一定限度时, 积聚的退扭力能使电缆打结。

**电缆的允许扭力** 圈装海底电缆时的允许扭力以圈形周长单位长度的扭转角不大于  $25^\circ/\text{m}$  为限度。敷设圈装海底电缆时退扭力以退扭架的高度不小于圈形内圈周长或外圈直径为限度。

**敷设充油电缆时压力箱最低允许油压计算** 敷设充油电缆时, 为防止侧压力压扁电缆, 在敷设路径上的弯曲部分, 电缆内部的油压不得低于 0.2 MPa。当敷设路径有很大高差时, 在最高处电缆内部的油压不得低于最低允许工作油压。因此, 在这两种情况下要计算与电缆相连接的压力箱内的最低允许油压, 其值为敷设路径上弯曲部分或最高处与压力箱之间的高差所决定的静油压与该两处电缆内部所要求的最低压力之代

数和。

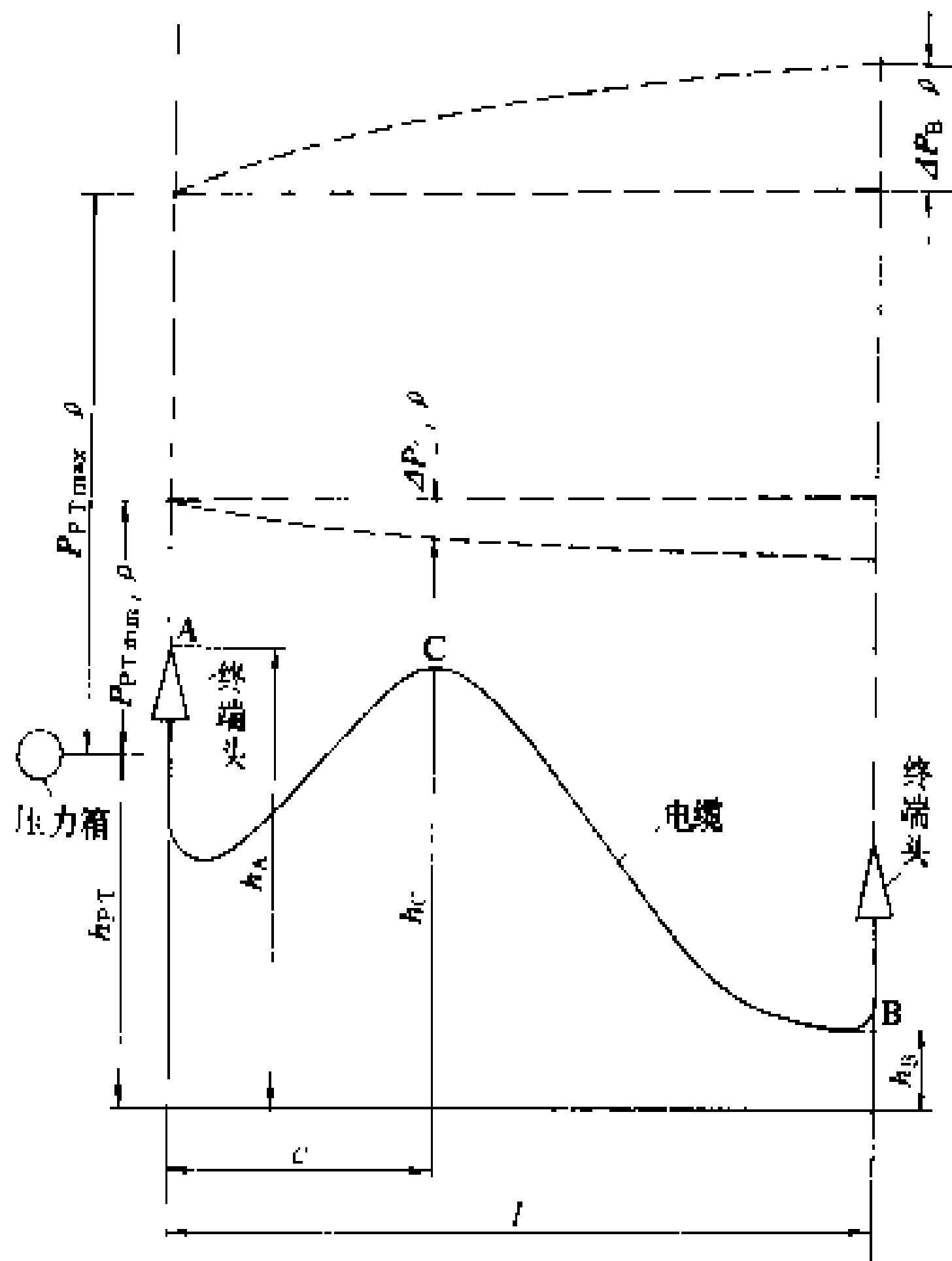
(王焜明)

dianlan gongyou zhuangzhi yunxu gongyou yali  
jisu

电缆供油装置允许供油压力计算 (calculation of the permissible pressure for cable oil feeding equipment)

为使充油电缆的油压保持在允许范围内, 根据电缆线路的最大和最小允许工作压力, 对电缆线路在环境温度最高的夏季满载时供油装置的最大允许供油压力, 和在环境温度最低的冬季不带电时供油装置的最小允许供油压力的计算。最大和最小允许供油压力, 取决于电缆线路的长度、高差、负荷和环境温度等因素。

如图所示为由压力供油箱(见充油电缆供油装置)在一端供油的充油电缆线路最大和最小允许供油压力分布情况。



电缆线路由压力供油箱在一端供油时的压力分布

静态压力计算 在电缆线路的负荷不变时, 电缆内部的油压为静态压力。

(1) 在夏季满载时压力箱的供油压力最大, 线路最低处 B 点的油压为线路上的最大静油压, 此值要小于电缆的最大允许静油压, 即

$$\frac{P_{PTmax}}{\rho \times 10^{-2}} + h_{PT} - h_B \leq \frac{P_{CSmax}}{\rho \times 10^{-2}} \quad (1)$$

式中  $P_{PTmax}$  为压力箱的最大允许供油压力, MPa;  $\rho$  为电缆油的密度,  $g/cm^3$ ;  $h_{PT}$  为压力箱上压力表的高程,

m;  $h_B$  为电缆线路最低点 B 的高程, m;  $P_{CSmax}$  为电缆的最大允许静油压, MPa。

(2) 在冬季电缆线路不带电时, 压力箱的供油压力最小, 线路最高处 (包括终端头) A 点的油压为线路上的最小静油压, 此值要大于电缆的最小允许静油压, 即

$$\frac{P_{PTmin}}{\rho \times 10^{-2}} + h_{PT} - h_A \geq \frac{P_{CSmin}}{\rho \times 10^{-2}} \quad (2)$$

式中  $P_{PTmin}$  为压力箱的最小允许供油压力, MPa;  $h_A$  为电缆线路最高处 A 点的高程, m;  $P_{CSmin}$  为电缆的最小允许静油压, MPa; 其余符号的意义同式 (1)。

暂态压力计算 在电缆线路的负荷变化时, 电缆内部的电缆油因膨胀或收缩而产生的油流在油道内分别产生暂态压力升或暂态压力降, 两者均简称为暂态压力。在油压变化的暂态过程中, 作用在电缆上合成的瞬时压力为暂态发生前的静态压力与暂态压力升之和。

(1) 电缆负荷增加时, 在电缆线路的最低处 B 点出现最大瞬时压力不得大于电缆的最大允许瞬时油压。暂态压力升的最大值出现在冬季电缆线路由不带负荷状态突然满载时, 但此时 B 点的静态压力最小。最大静态压力是在夏季满载时, 但在夏季接近满载时产生的暂态压力升并不是最大值。因此要正确计算静态压力和暂态压力升两者之和的瞬时压力的最大值是很复杂的, 但可按图所示近似地把 B 点的最大静态压力与最大暂态压力升之和视为最大瞬时压力, 于是压力箱的最大允许供油压力应满足下列条件

$$\frac{P_{PTmax}}{\rho \times 10^{-2}} + h_{PT} - h_B + \frac{\Delta P_B}{\rho \times 10^{-2}} \leq \frac{P_{CTmax}}{\rho \times 10^{-2}} \quad (3)$$

式中  $\Delta P_B$  为电缆线路最低处 B 点的暂态压力升, MPa;  $P_{CTmax}$  为电缆的最大允许瞬时油压, MPa; 其余符号的意义同式 (1)。

(2) 电缆负荷减少时, 在电缆线路的最高处 (不包括终端头) C 点出现最小瞬时压力, 其值为暂态前 C 点的静态压力与暂态压力降的绝对值之差, 不得小于电缆的最小允许瞬时油压。同样, 可近似地取电缆线路在冬季时 C 点的最小静态压力与在冬季出现的最大暂态压力降的绝对值之差视为 C 点的最小瞬时压力, 于是压力箱的最小允许供油压力应满足下列条件

$$\frac{P_{PTmin}}{\rho \times 10^{-2}} + h_{PT} - h_C - \frac{\Delta P_C}{\rho \times 10^{-2}} \geq \frac{P_{CTmin}}{\rho \times 10^{-2}} \quad (4)$$

式中  $\Delta P_C$  为电缆线路最高处 (不包括终端头) C 点的暂态压力, MPa;  $P_{CTmin}$  为电缆的最小允许瞬时油压,

MPa; 其余符号的意义同式 (1)。

在式 (3) 和式 (4) 中的暂态压力可按式 (5) 计算

$$\Delta P_x = -ab \left( lx - \frac{x^2}{2} \right) \times 10^{-4} \quad (5)$$

式中  $\Delta P_x$  为离供油装置距离为  $x$  处的电缆内部的暂态压力, MPa;  $a$  为电缆的需油率,  $\text{cm}^3/(\text{s} \cdot \text{cm})$ ;  $b$  为电缆油道的阻力系数,  $\text{g} \cdot \text{s}/\text{cm}^6$ ;  $l$  为供油长度, m。

对如图所示的只在一端供油的线路, 供油长度等于电缆线路的长度。当  $x=l$  时, 可求得 B 点暂态压力升  $\Delta P_B$  为

$$\Delta P_B = -\frac{1}{2}abl^2 \times 10^{-4}, \text{ MPa}$$

当  $x=c$  时, 得 C 点的暂态压力降  $\Delta P_C$  为

$$\Delta P_C = -ab \left( lx - \frac{c^2}{2} \right) \times 10^{-4}, \text{ MPa}$$

在计算  $\Delta P_B$  和  $\Delta P_C$  时,  $a$  和  $b$  的值应分别取电缆在增加负荷和减小负荷时  $a$  与  $b$  乘积的最大值, 即  $(ab)_{\max}$ 。

压力箱的最大和最小供油压力必须同时满足式 (1) ~ 式 (4), 据此就可确定压力箱的最大和最小允许供油压力。

参考书目

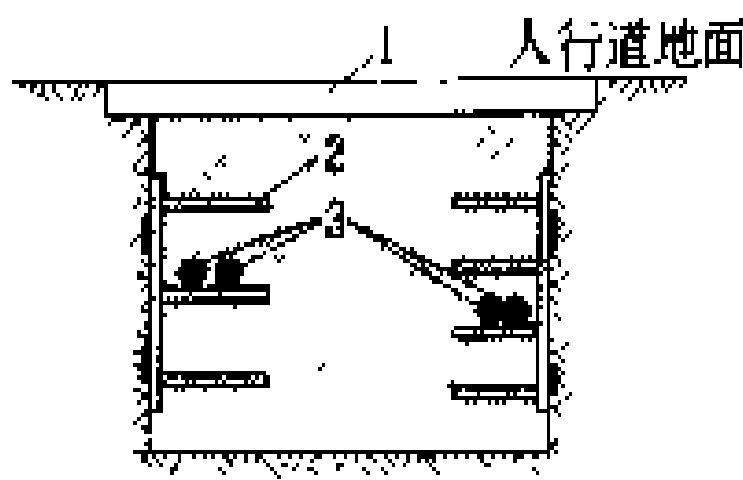
郑肇骥, 王焜明主编. 高压电缆线路. 北京: 水利电力出版社, 1983

(王焜明)

dianlangou fushe

**电缆沟敷设** (cable trench laying) 将电缆敷设在预先砌好的电缆沟中的一种电缆安装方式。适用于地面载重负荷较轻的电缆线路路径, 如人行道、工厂内的场地等。

电缆沟一般采用混凝土或砖砌结构, 其顶部用盖板覆盖。盖板面可以和地面齐平, 便于开启, 也有的稍低于地面而在盖板上粉刷一层水泥, 以防止盖板与地面高低不平和雨水进入电缆沟。根据所敷设电缆的数量不同, 可以将电缆单层搁置在电缆沟底, 也可以将电



电缆沟结构示意图

1—盖板; 2—支架; 3—电缆

缆分层搁置在电缆沟的支架上, 大部分使用后一种形式。分层搁置的电缆留有纵向及横向间距。电缆支架可根据敷设电缆的数量装在电缆沟的单侧或两侧。两侧支架之间或支架与电缆沟侧壁 (单侧支架) 之间留有一定宽度的通道, 如图所示。有的电缆沟内, 为了防火还填有黄沙。

电缆沟敷设的优点类似于电缆排管敷设, 且不需

要人井, 减少了投资。缺点是盖板承压强度较差, 不能使用在车行道上, 且电缆沟离地面太近, 降低了电缆的载流量。

电缆沟敷设早先用在发电厂及变电所内。英国曾利用街道电缆沟的电缆热量, 溶化人行道上的积雪。20 世纪 70 年代, 中国也开始少量使用人行道电缆沟。

(李霞娟)

dianlan guzhang

**电缆故障** (cable failure) 电缆在预防性试验时发生绝缘击穿或在运行中因绝缘击穿、导线烧断等而迫使电缆线路停止供电的故障。电缆故障按其故障部位不同可分为电缆本体故障、电缆接头故障、电缆终端故障三部分。

电缆本体故障除了外力破坏的原因外, 一般是由于电缆在制造时设计不良、用料不当或工艺缺陷所致, 如绝缘过早老化、铅套结晶龟裂, 充油电缆金属套漏油和塑料电缆出现水树枝等。电缆接头和电缆终端的故障主要由于电缆附件的设计缺陷、施工安装质量不良或运行维护工作不当所致, 如电缆接头和电缆终端的浸潮、金属套的腐蚀 (化学腐蚀或电解腐蚀)、电缆终端套管的污闪或接点的接触不良等。对于发展中的城市来说, 电缆故障以外力损坏最为常见。

电缆运行人员需对每一次电缆故障认真进行分析。故障分析需要从多方面来进行, 其中以对故障实物的剖析最为重要, 如果看不到故障实物, 或是变动了故障实物的原状, 都会影响到分析的正确性, 甚至根本无法分析故障原因。因此, 故障实物的保存并及时分析历来都受到重视。对于在检修中易被破坏现状的故障, 通常是在现场进行调查分析。如果是电缆本体故障, 则应完整地将附近一段电缆取下剖析, 并将典型的故障实物收集起来加以保存或拍照保存, 作为进一步深入研究故障原因和制订反事故措施以及培训等的参考资料。

(屠俊良)

dianlan guzhang cexun

**电缆故障测寻** (cable fault location) 利用测试仪器设备寻找电缆故障点的方法。测定电缆故障点前要先确定故障的性质, 选用最佳的初测法确定故障区段后, 再用精测定点法证实故障点的位置。充油电缆的漏油和充气电缆的漏气属于金属套的缺陷, 一般常用流量法来确定。

**故障性质确定** 用仪表测量电缆绝缘变化程度和导体是否连续, 以确定故障是绝缘损坏还是导体断线。电缆绝缘的变化有一相、二相、三相和相间之分, 同时



又有高阻、低阻、金属性接地的差别，少数也呈现封闭性故障(闪络故障)。导体的连续性可分为一相断线、二相断线和三相全部断线等情况。通常电缆故障主要是绝缘的损坏，但也有同时烧断导体的现象。只有确定了故障性质后，才能选用合适的初测法和精测定点法。

**初测法** 按故障性质不同，选用合适的仪表，利用电缆线路技术资料测量并计算出故障点离测试点的距离和故障点的路径位置。初测法主要有回路电桥平衡法、低压脉冲反射法和闪测仪法三种。

**回路电桥平衡法** 简称电桥法，是利用故障电缆的长度与电阻成线性的关系，将直流电桥改接成便于测量电缆一相或二相低阻抗接地的方法。电桥法的原理示意如图 1 所示。接地电阻值的范围依电桥的使用电压和检流计的灵敏度而定，一般 $<100\text{k}\Omega$ 。当接地电阻值很大时，电桥电源的很大一部分电压将降落在该接地电阻上而使检流计很不灵敏，致使测量误差增加。为了扩大电桥法的应用范围，可以提高检流计的灵敏度和升高电桥电源电压，但这两种措施都是有限度的。提高检流计灵敏度的办法可在检流计前加装直流放大器，但放大器的增益过高会产生严重的零点漂移现象而导致电桥无法平衡。升高电桥电源的电压需要相应增加桥体对地的绝缘强度和采取保护操作人员的安全措施，当电源电压升高到一定值时，故障电阻通常表现为不稳定的状态，如果接地电阻突然下降为零，高压就会全部加在电桥上而使检流计烧毁。

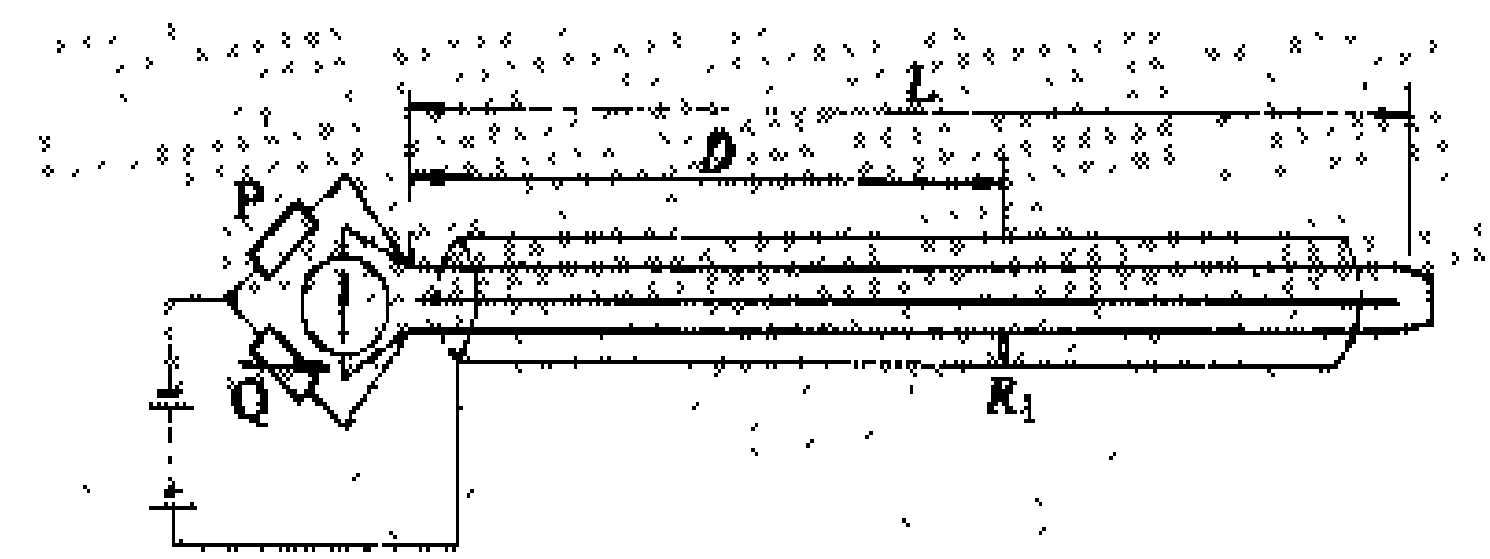


图 1 电桥法原理示意

电桥法的特点和要求是：①只适用于测量电缆线路中的单点故障，如果线路中同时存在几个故障点，就不能应用；②电缆线路另一端的跨接线越短越好，其截面积应接近电缆导体的截面积，并紧固连接，使其接触电阻接近于零；③提高试验电压作高电阻接地故障测试时，必须特别注意安全问题。

用故障烧穿装置将闪络性故障转化为接地故障后，需立即用电桥法测量，以免绝缘恢复使故障点重新封闭。同时不要把故障的接地电阻烧得太低，以免用精测定点法时带来音量过小的困难。

**低压脉冲反射法** 简称脉冲法，是利用脉冲信号在电缆线路中传播时遇到波阻抗不匹配点产生电磁波反射的原理，由示波器上测得脉冲波反射时间和电缆波速，确定电缆故障点的距离。脉冲法的接线示意如图

2 所示。通常电缆线路中的阻抗不匹配点，除了导体断

线(开路)、短路和接地故障外，在电缆接头和电缆穿过金属管道等处也都是阻抗不均匀点，同样

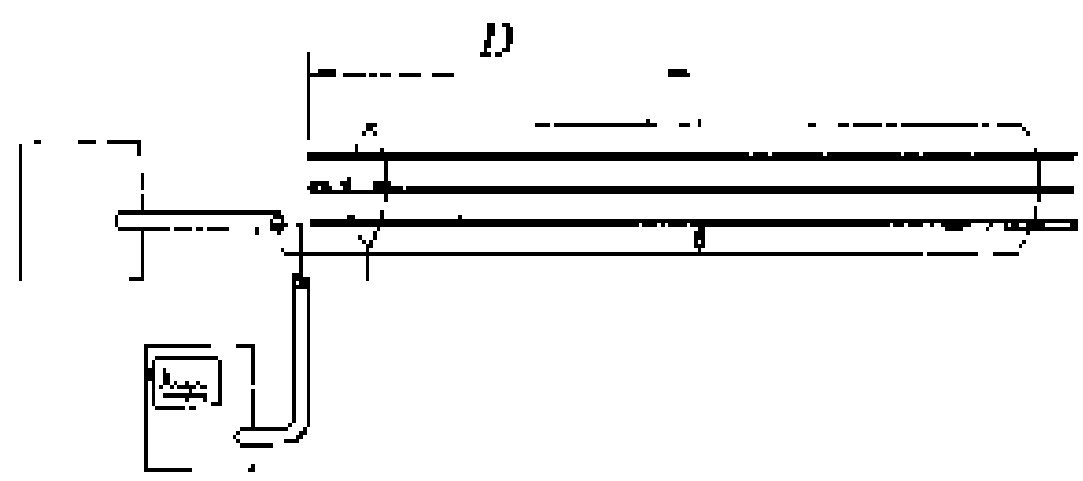


图 2 脉冲法接线示意

会产生波的反射，测试时必须仔细辨别。尤其是当接地电阻值大于电缆波阻抗的 2~3 倍以上时，反射波幅值很小，更难以辨别故障点。脉冲法最适用于测寻断线故障，同时也适用于测寻接地电阻小于  $100\Omega$  的电缆故障。数字式电缆故障测试仪可将故障点距离用五位数码管显示的数字直接读出，其原理是利用输入电缆的发送脉冲及其遇到故障点发生反射所形成的反射脉冲控制电子计时开关，利用运算器将所测得的时间与电缆中信号传播的速度按一定的函数关系进行运算，最终从数码管上可直接读出以米为单位的故障点距离值。

**闪测仪法** 在电缆故障相上施加直流高压或冲击高压使故障点绝缘瞬时击穿，利用击穿放电时的电波来回反射的时间及电波在电缆中的传播速度，可求得故障点距离。闪测仪可分为数字直读式和示波器式两种。用闪测仪测故障时不需事先将高阻接地烧穿，故本方法被广泛采用。

**精测定点法** 电缆故障在初测时不可避免存在有测量误差，还需作进一步的精测定点。精测定点法有声测法和感应法两种。

**声测法** 用一个大容量的高压电容器充电后对故障电缆芯定时放电，这时在故障点处形成机械振动和放电声音。在地面上可用传感器接收这种音响。根据初测区段放电声的音量大小，音量最大的即是故障点的精确位置。声测法只适用于低电阻接地的电缆故障，对金属性接地的故障效果不佳。

**感应法** 在故障电缆芯上输入一个音频信号，由于电缆线芯的绞绞效应，在电缆故障点前接收到的时起时伏的感应信号比在电缆故障点后接收到的感应信号幅度要强得多，从而找出故障点。感应法适用于金属性接地故障和相间短路故障。

**漏油点测寻** 用浮子式流量计接在压力箱和电缆油管路之间，测量充油电缆微量渗油的变化，以此确定漏油点的位置。漏油点测寻法主要有冷冻分段法和油流法两种。

**冷冻分段法** 用保温良好的液氮盒临时装在电缆线路全长的中间点，盒中灌注液氮后，约一个小时，观察浮子式流量计有否读数。如果仍有油流量，肯定漏油



点在液氮盒的前一段。再在电缆线路全长的 1/4 处，临时装上液氮盒，继续观察油流量，直至分段发现漏油点为止。冷冻分段法虽较费时，但较实用，不过在取下液氮盒时，要求有足够的解冻时间，防止电缆外护层处在低温时的脆裂损坏。

**油流法** 在同一只压力箱的油压下利用漏油点的距离和油流量成线性关系的原理计算出漏油点距离的方法。油流法的原理示意如图 3 所示，漏油点距离的计算公式为

$$x = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 + Q_3 - 2Q_1} \times 2L$$

式中  $x$  为测试点至漏油点距离，m； $Q_1$  为参考相电缆的流量计读数，ml； $Q_2$  为完好相电缆的流量计读数，ml； $Q_3$  为漏油相电缆的流量计读数，ml； $L$  为电缆线路全长，m。

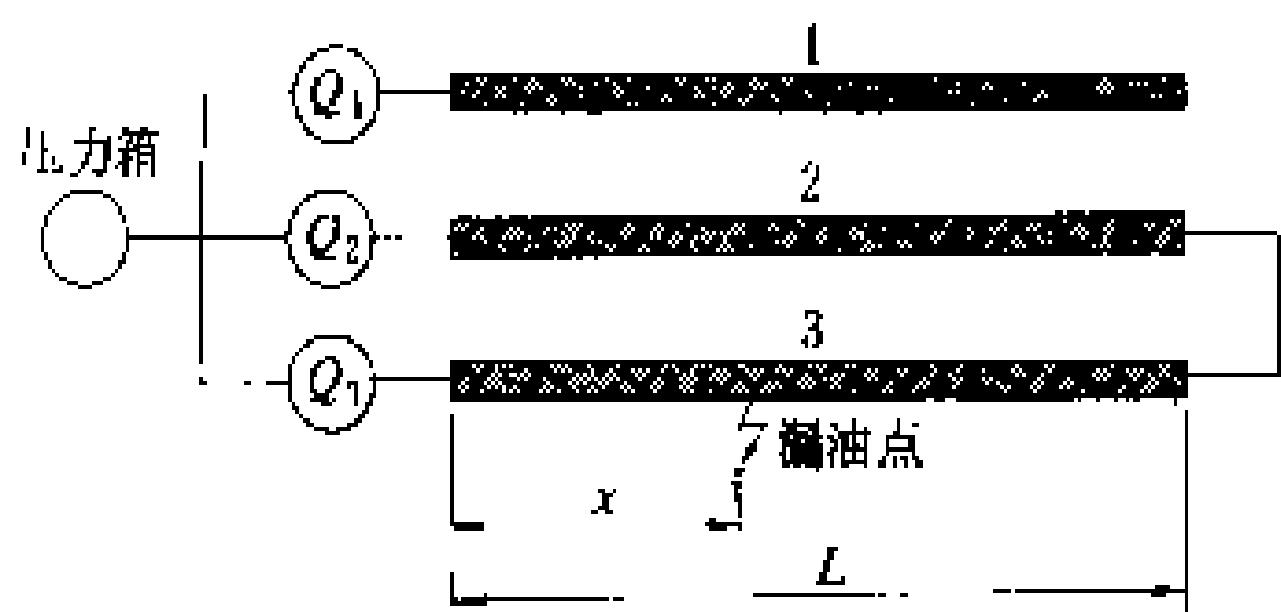


图 3 油流法测量充油电缆漏油点原理示意

**漏气点测寻** 采用气体流向指示器测寻充气电缆漏气点，因为气体总是向漏气点流动，这样就可找到漏气的线段。漏气线段确定后，可以进一步寻找漏气点。测寻方法有流量法、压力法、示踪气体法、声测法等。

**参考书目**

郑肇骥，王昆明主编，高压电缆线路，北京：水利电力出版社，1983

(屠俊良)

dianlan guzhang xiuli

**电缆故障修理** (cable failure repair) 电缆线路发生故障后，通过测寻找到故障点，按故障情况采取相应的修理措施。电缆线路发生故障后通常立即抢修，以避免水分侵入电缆内而扩大修理范围。修理措施可分为油浸纸绝缘电缆修理、固体挤压聚合电缆修理、自容式充油电缆修理和护层修理四类。修理结束后对电缆线路进行直流耐压试验，对三芯电缆还须核对相位（见电缆线路交接试验）。修理竣工后，将修理记录及时填入故障报告书（见电缆线路技术资料）。如果故障的原因未能在现场分析清楚，可携回故障实物，拍摄图片归入宗卷，待进一步分析查明。

油浸纸绝缘电缆中的绝缘纸能很快吸收来自故障点周围的水分，修理时，在锯除电缆线路损坏部位后，

常需采取逐步割除的方法检查两侧电缆的油浸纸绝缘是否有水分侵入，直至全部清除为止。检查的具体方法是将逐层剥下的绝缘纸浸入约 150℃ 电缆油内观察，含有潮气的绝缘纸在热油中将产生泡沫并有声响。割除全部损坏部位后，换上同规格的电缆，安装新的电缆接头或电缆终端，修理工作即告结束。

固体挤压聚合电缆的绝缘虽然水分渗透很慢，但故障点的导体，由于绞线间的空隙具有毛细管作用，也能吸进大量来自故障点周围的水分，而含有水分的导体容易诱发交联聚乙烯绝缘的水树枝放电。修理的措施是：锯除故障部位，临时装上带有阀门的密封套头，接上真空泵，在电缆线路的另一端再接上干燥高压氮气瓶，使干燥氮气在压力差下带走侵入导体内的水分，直至水分被全部排除为止。最后换上同规格的电缆，安装新的电缆接头或终端。

充油电缆线路故障后，在两侧尽快接上临时压力箱，保持稍大于大气压力的油压，然后锯除或修理故障部位。对已经失去油压或因电缆油的大量流失无法保持油压稍大于大气压力的电缆故障，应采取和油浸纸绝缘电缆一样的修理措施，逐段锯除，检查绝缘纸中是否含有侵入水分，直至水分被全部清除为止。最后再换上同规格的电缆，安装新的电缆接头或终端。（见充油电缆安装）

对护层有绝缘要求的电缆线路，在测得准确的故障位置后，可以用与护层同样材料的补钉块以塑料焊枪热风吹焊或用自粘结橡胶带紧密包扎。损坏较多的护层也可套上热缩卷包管卷包后，加热收缩。修补过的护层需再做护层直流耐压试验或接地电阻试验。

(屠俊良)

dianlan jietou

**电缆接头** (cable splice; cable joint) 电缆与电缆相互连接的部件。有些电缆接头还同时具有其他功能。电缆接头可分为直线电缆接头、绝缘电缆接头、塞止电缆接头、过渡电缆接头、分支电缆接头、电缆软接头等。对电缆接头的基本要求是：恢复电缆导体在连接处的导电性，具有足够的绝缘强度和防潮性能，其密封套还应具有防腐蚀性能。

**导体连接** 电缆的导体之间通常用相当于导体外径四倍长的连接管连接，连接管的断面积等效于导体的截面积。连接管带有螺孔，用锡焊法连接时则带有开口槽。用机械法连接时，现大多采用压接法，因此连接管有时也称压接管。压接的方式有点压法、圆压法和六角形法，按导体截面大小和电压等级不同而选用，电压越高连接管表面要求越光洁。用药包焊或氩弧焊连接导体时，不须用连接管，大截面铝导体常用氩弧焊连



接。(见电缆导体连接)

所有导体连接都要求连接管长度内的电阻不大于同长度导体电阻，且抗张强度不低于导体的 50%。

**接头绝缘** 导体连接管外径大于导体直径，接头内的复合绝缘厚度和电缆绝缘厚度不同，这就使得接头产生了轴向应力(见电缆电场应力)，因此除低电压电缆接头外，高电压电缆接头都需考虑绝缘设计，包括电缆应力锥、反应力锥及两种绝缘介质界面的滑闪距离等。电缆接头的绝缘设计按电缆的结构不同可分为油浸纸绝缘电缆接头和固体挤压聚合电缆接头的绝缘设计。

**油浸纸绝缘电缆接头** 用绝缘带或纸卷绕包在导体连接管外面作为主要绝缘，填充电缆油或电缆胶作为辅助绝缘。在导体连接处的绕包厚度一般为电缆绝缘厚度的 2 倍。

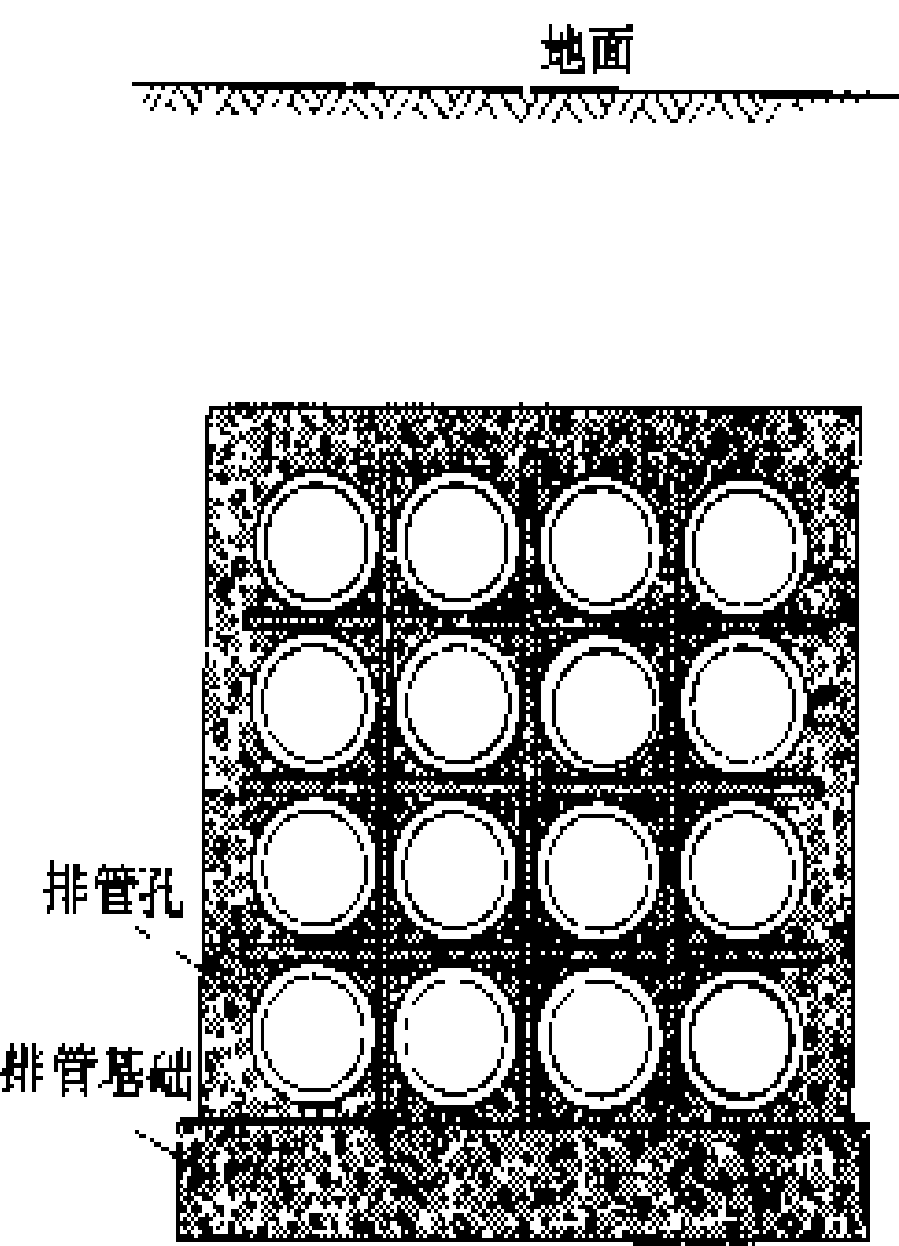
**固体挤压聚合电缆接头** 有五种绝缘结构：①用自粘结橡胶带绕包；②用热缩型交联聚乙烯管加热收缩面成；③用辐照过的聚乙烯带绕包后加温加压成型；④用可交联聚乙烯电缆料经注射法加温加压模塑而成；⑤用工厂预制部件的接头。

**接头密封** 密封方式分为四种：①以铅管或紫铜壳作为接头盒，其两端以封铅与电缆的金属套封设，主要用于高电压油浸纸绝缘电缆；②以金属盒用机械方法卡装，灌注沥青胶密封，主要用于低电压油浸纸绝缘电缆；③用热缩或冷缩管作为接头密封，主要用于固体挤压聚合电缆；④用塑料接头盒灌注环氧树脂或聚胺脂等密封，可用于油浸纸绝缘电缆和固体挤压聚合电缆。

(李益荪)

dianlan paiguan fushe

**电缆排管敷设** (duct cable laying) 将电缆敷设在预先埋设于地下的管子中的一种电缆安装方式。通常用于交通频繁、城市地下走廊较为拥挤的地段。将电缆线路的路径开挖至设计的深度和宽度后，先在沟底浇注混凝土基础，再将分层组合的塑料管或石棉水泥管放在基础上，而后用混凝土填满管间的孔隙，待混凝土坚硬后恢复路面，如图所示。排管每达到一定长度后，设置一座人井，两座人井间的距离决定于



排管示意图

敷设电缆时的允许牵引长度和地形。

人井主要用作牵引电缆进入排管的施工场所，兼作放置电缆接头和安装接头用地。人井的四壁和顶板由于受到上面道路车辆的荷重和冲击，常用钢筋混凝土板制成。人井的出入孔由于使用频繁，常用铸铁作成盖和座。较大的人井设置两个出入孔，以便施工时，一个作为进风口，使井内空气流通。

电力电缆线路用排管敷设受到机械损坏的可能性减少，因此电缆不需要铠装，但在牵引电缆时由于金属套与排管内壁摩擦，容易被损坏，故在制造时通常都增加了金属套的厚度，国际上还将这种电缆称作排管电缆。

排管敷设的优点是土建工程一次完成，其后在同途径陆续敷设电缆，不必重复开挖道路，此外不易受到外力机械损坏。缺点是土建工程投资较大，工期较长，而且如果排管中的电缆损坏，需要更换两相邻人井间的整根电缆。

20 世纪 20 年代，日本首先采用了排管敷设电缆线路，其后在美国得到推广使用。中国在 30 年代也已采用排管敷设。由于排管土建工期较长，在日本相继发展了预制式的排管和人井。也有的用高强度塑料管，省却了混凝土浇注工序。

**参考书目**

飯塚喜八郎，電力ケーブル技術ハンドブック，東京：株式会社電気書院，1989

(李霞娟)

dianlan peidianwang

**电缆配电网** (underground cable distribution network) 以地下配电电缆线路和配电变电所组成的向用户供电的配电网。电缆配电网与架空配电网的功能相同，但电缆的建设和运行费用昂贵，因此只在为城市景观要求、政府规定不准架设架空线和架空线走廊有困难的地方，以及负荷密度高、用架空线不能满足要求时，才采用电缆线路。原来采用架空配电网的城市，在发展过程中，随着负荷密度的增高，会逐步增加电缆线路的比重，并趋向将架空线入地，成为电缆配电网。(见高压配电网、中压配电网、低压配电网)

在规划设计电缆配电网时，要预见今后较长时期(一般为 20 年以上)电力负荷与市政建设的发展，以选择最适当的电缆网络接线、电缆线路途径、电缆型式、电缆敷设方式。电缆配电网适用于城市供电，更适用于电力负荷密度较高地区和用电集中地区的供电。电缆线路的设计施工远比架空线路的复杂，且电缆线路故障后修复时间较长，因此中、高压的电缆配电网目前以

环形接线或多回路供电方式为主,某些国家还辅以自动化功能,以提高电缆配电网的供电可靠性。对低压用户,在用电负荷比较集中、线路分支比较少的情况下,最适宜采用电缆配电网。(见电缆线路设计、电缆线路运行维护、电缆线路巡视检查、电缆故障测寻、电缆故障修理)

电缆配电网随着城市建设的发展而产生,必将随着城市发展向着高层建筑、地下建设、集中用电、大量用电等方向进一步扩展。具体发展趋势有四个方面:①大容量电力电缆的采用,包括较高电压等级的橡塑电缆的大量使用,以满足大量用电负荷、高层建筑供电、集中用电负荷的需要;②供电设备的小型化与简化,例如单元配电装置和环网配电装置在电缆配电网中的配合使用,以及在城市中心区进一步实施地下配电网;③改进电缆配电网的接线,进一步提高其供电可靠性,例如采用环形接线、多回路接线、点网式接线等;④低压格式网络虽在各国一些大城市的低压配电网中曾广泛使用,但某些建设较早、容量日益增长的格式网络在今后的发展中将受到一定的限制,新增低压负荷有采用其他网络接线型式(例如放射式接线)的趋势。(见配电网接线)

(唐德光)

diantan pingbi xishu

电缆屏蔽系数 (cable screening factor)

在采取磁屏蔽措施后,电力电缆线路由于导体电流所产生的磁通对邻近平行管线所感应的电压值,与未采取措施时所感应的电压值之比。估算和测量屏蔽系数是为了研究邻近平行管线是否要采取必要的防护措施,如增大平行间距,加装保护器等。不少国家规定在敷设电缆线路前,需提出相应的屏蔽计算申请报告,其中电缆屏蔽系数是重要的参数之一。

电力电缆屏蔽系数 电力电缆的负荷电流形成的合成磁通对外界影响并不大,危害较大的情况是导体通过故障电流,最显著的是单相接地故障。因此,采取磁屏蔽措施主要是使导体通过单相接地故障电流时对邻近管线的影响最小。由于采用的磁屏蔽措施不同,因此电缆线路的屏蔽系数也不相同。常用的逆向磁通措施,如单芯电缆的金属套在电缆线路两侧互联接地或金属套采用交叉互联,采用这种措施时的电缆屏蔽系数为

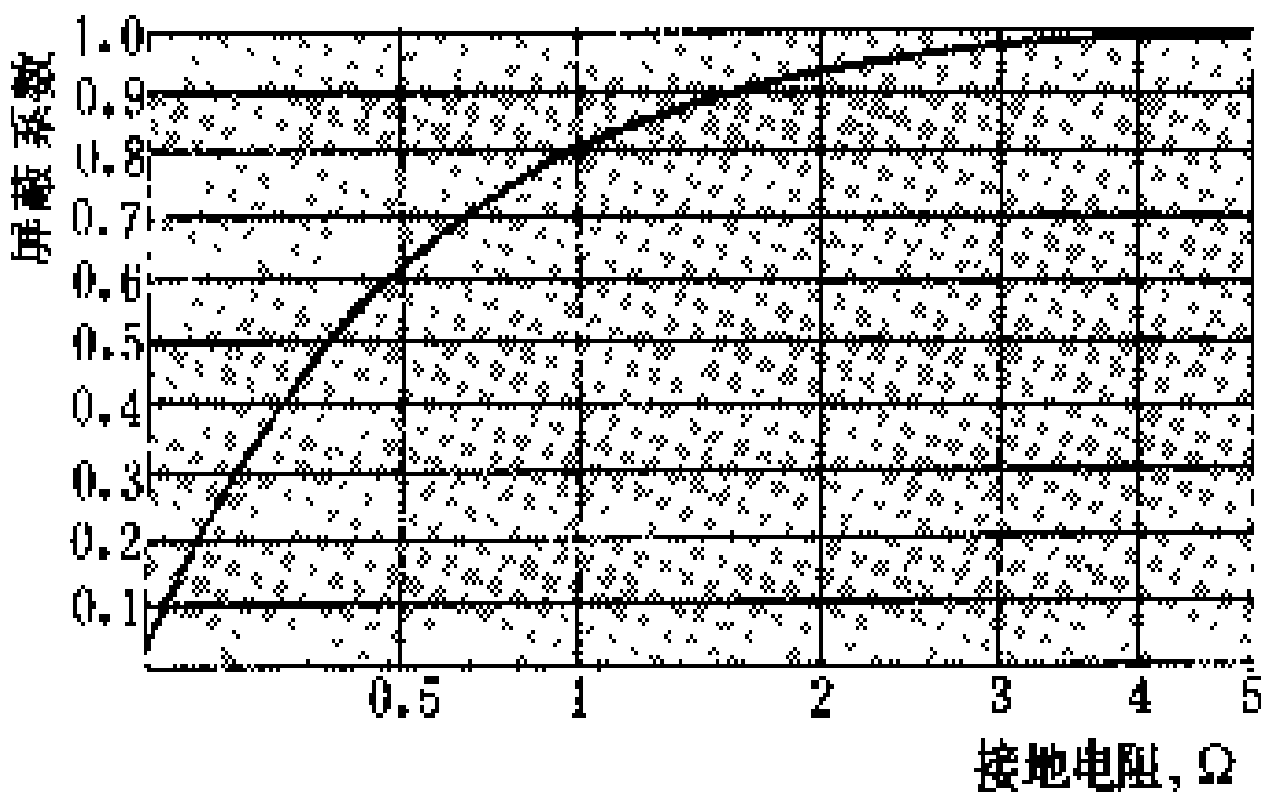
$$K_c = 1 - \frac{Z_m}{Z_s} = \frac{R + R_s}{R + R_s + R_t + j\omega L_t} \tag{1}$$

式中  $Z_m$  为电缆导体和金属套各以大地作回路的互感

阻抗; $Z_s$  为电缆金属套以大地作回路的自感阻抗; $R$  为电缆线路两侧接地电阻之和; $R_s$  为大地电阻; $R_t$  为三相电缆金属套并联电阻; $\omega$  为角频率; $L_t$  为电缆金属套以大地作回路的自感。

从式(1)中可知,电缆线路中不同的  $R_t$ 、 $L_t$ 、 $R$  值都会使  $K_c$  变化,因此屏蔽系数不是一个定值。用铝作金属套的电缆比用铅的屏蔽系数小,屏蔽效果好,因为铝的电阻率比铅的电阻率小一个数量级。

$R=0$  时的  $K_c$  称作理想屏蔽系数,因为接地电阻包括接地极电阻和接触电阻,总是大于零,通常是屏蔽系数不能减小的主要因素。图示为屏蔽系数与接地电阻的关系。



屏蔽系数与接地电阻的关系

通信电缆屏蔽系数 通信电缆的金属套与电力电缆的金属套相似,一般在两侧均接地,其屏蔽系数为

$$K_t = \frac{R + R_t}{R + R_s + R_t + j\omega L_t} \tag{2}$$

式中  $R$  为通信电缆线路两侧接地电阻之和; $R_t$  为通信电缆金属套电阻; $R_s$  为大地电阻; $L_t$  为通信电缆金属套以大地作回路的自感。

城市屏蔽系数 城市中的地下管线除了电力电缆和通信电缆的金属套外,其它平行管道如金属水管、煤气管等都感应了纵向电势,由于这些管道都是接地的,因而也转变成逆向电流,产生了逆向磁通,起到屏蔽效果。城市屏蔽系数为

$$K_0 = \left| 1 - \frac{Z_{12} Z_{22}}{Z_1 Z_{12}} \right| \tag{3}$$

式中  $Z_{12}$  为电力电缆与平行管道以大地作回路的互感阻抗; $Z_{22}$  为通信电缆与平行管道以大地作回路的互感阻抗; $Z_1$  为平行管道以大地作回路的自感阻抗; $Z_{12}$  为电力电缆与通信电缆以大地作回路的互感阻抗。

城市中的地下管道错综复杂,计算前需先将各个平行管线的相对位置、结构尺寸、磁导率精确绘制,然后用计算机求取。

综合屏蔽系数 通信电缆屏蔽系数  $K_t$  与城市屏蔽系数  $K_0$  的乘积称作综合屏蔽系数。通常计算城市屏蔽系数较困难,也可用实测到的通信电缆感应电压  $U_m$  和没有平行管道以理论计算得到的通信电缆感应电压



$U_c$  相比, 得出综合屏蔽系数

$$K = \frac{U_m}{U_c} \quad (4)$$

新安装的电力电缆线路在计算对通信电缆线路的危险电压时, 可将电力电缆屏蔽系数  $K_c$  和综合屏蔽系数  $K$  相乘, 再乘以  $U_c$ , 即可得出准确的通信电缆中的干扰电压。

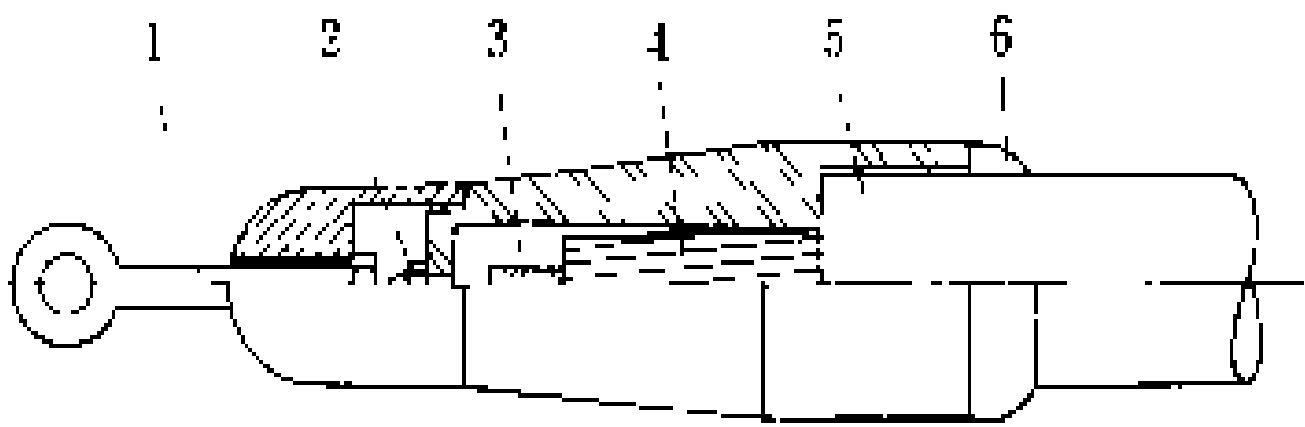
参考书目

飯塚喜八郎, 電力ケーブル技術ハンドブック, 東京: 株式会社電気書院, 1989

(陆德雄)

dianlan qianyinduan

**电缆牵引端** (cable pulling eye) 装在电缆首端作牵引电缆用的一种金具。它将牵引钢丝绳上的拉力, 传递给电缆的导体和金属套。电缆牵引端要能承受电缆敷设时的拉力, 安装后要具有与电缆金属套相同的良好密封性能, 防止水分渗入而影响电缆的绝缘性能。由于电缆型式结构不同, 牵引端的设计和式样也不尽相同, 如图所示为一种单芯自容式充油电缆用的电缆牵引端。因为充油电缆在敷设时始终要保持内部油压, 故其牵引端装有油嘴, 便于电缆牵引完后与临时压力箱相连。



单芯充油电缆的牵引端

1—牵引梗; 2—油嘴; 3—倒刺钢塞; 4—导体; 5—牵引端本体; 6—铅封

同一型式的电缆, 如果导体截面积不同, 牵引端则不能通用。高压电缆的牵引端一般由制造厂设计并在电缆出厂前装上。缺少牵引端时, 可自行设计安装, 但事先要通过牵引力计算, 并经拉力试验合格后才能使用。

有些牵引端有退扭作用, 即拉环可以转动。拉环不能转动的牵引端需和防捻器(见电缆安装机具)串联使用, 以防牵引钢丝绳受张力后旋转弹跳。

(陆德雄)

dianlan ruanqietou

**电缆软接头** (soft joint; flexible joint)

一种可以弯曲的电缆接头。电缆软接头可分为两类: 一类是生产大长度海底电缆时, 在制造厂制作的软接头, 也称厂制接头; 另一类是检修海底电缆时, 在现场用手

工制作的软接头, 也称为检修软接头。

厂制接头已用在各种电压等级的电缆线路中, 而检修软接头由于现场施工条件的限制, 只用在 35 kV 及以下的电缆线路中, 特别是检修海底电缆时比较适用。

**厂制接头** 海底电缆线路长度超过制造厂的生产长度时, 制造厂先制成裸铅套半成品电缆, 在铠装过程前进行接头连接, 然后进行铠装。这种接头与电缆本体结构并无太大差别, 电气和机械性能也与电缆本体相同。

**检修软接头** 在现场将二根相同型号的电缆互相连接在一起的可以弯曲的电缆接头, 通常在检修海底电缆线路或接长电缆时用。这种接头虽然也可卷绕在电缆盘上, 但外观与电缆本体有明显差别。安装检修软接头的主要工艺有导体连接、绝缘恢复、密封壳体 and 铠装恢复。

**导体连接** 将两端导体顺势逐层松开, 按层次逐股用银焊或锡焊连接, 并使每层焊接不在同一断面处, 即每层绞线的焊接左右错开。这样的导体连接, 不用连接管, 外形和直径接近导体原形。

**绝缘恢复** 在裸露导体连接处逐层剥去纸绝缘, 使各层撕剥的长度与邻近层剥去的长度差 3~5 mm, 形成二个直线状的反应力锥。再用相同的电缆纸带恢复纸绝缘, 逐层包平二个反应力锥间的绝缘层。由于连接导体外径和绝缘层材料与电缆结构相同, 软接头不需用电缆应力锥。

**密封壳体** 导体连接前, 先套入一根内径稍大于电缆金属套外径的铅套管, 绝缘恢复后将铅套管两端用封铅与电缆金属套密封。

**铠装恢复** 两端钢丝在连接前顺势松开, 待密封壳体完成后, 包绕衬垫层和云母片并将预先套入的短段钢管放在铠装焊接处, 使钢丝复位后能焊接在钢管上。也可不用焊接法, 将两端钢丝交叉后在中间扎紧。

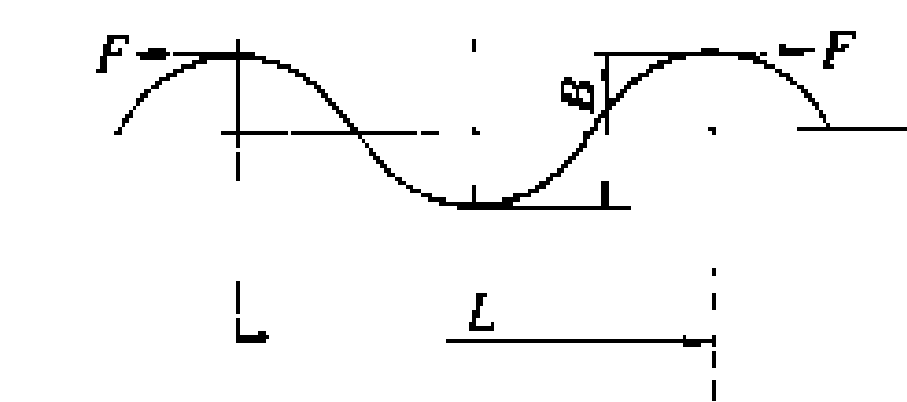
(史传卿)

dianlan shexing fushe

**电缆蛇形敷设** (cable snake installation)

为了吸收电缆的热膨胀而将电缆布置成波浪形的一种电缆安装方式。由于采用这种方式敷设后的电缆象一条行进中的蛇而得名。大截面电缆的负荷电流变化时, 由于温度的改变引起电缆热膨胀所产生的热机械力十分巨大。当电缆以直线状敷设在没有横向约束的空气中或敷设在用以强迫冷却的水槽中时, 巨大的热机械力将会使电缆线路集中在某一部位发生局部的横向位移, 而产生过分的弯曲。如对这种弯曲不加控制, 则将会损坏电缆。如将电缆敷设成如图所示的近似

于正弦波的连续波浪形时，人为设置的波形宽度能有效地吸收电缆的热膨胀。由于波浪形的连续分布，电缆的热膨胀亦均匀地被每个波形宽度所吸收而不会集中在线路的某一局部，从而使电缆的热膨胀弯曲得到控制。



蛇形敷设的波形  
 $L$ —波形节距的长度； $B$ —波形的宽度； $F$ —纵向力

交联聚乙烯电缆与自容式充油电缆相比，其导体工作温度高，重量轻和热膨胀系数大，其膨胀产生的弯曲变形要大。因此，在安装大截面交联聚乙烯电缆时，更需要采用蛇形敷设的方法。

根据蛇形敷设的波形相对于地面的方向，可分为水平方向和垂直方向两种蛇形敷设。电缆敷设在支架、电缆桥架和电缆槽内时采用水平蛇形敷设，电缆悬挂在挂钩上时采用垂直蛇形敷设。由于垂直蛇形不象水平蛇形要占据横向宽度，所以特别适用于隧道内的电缆安装，这样可充分利用隧道的高度而不必增加其宽度，以节约投资。

电缆敷设成蛇形后，由热膨胀产生的纵向力在克服由电缆重力产生的纵向力（垂直蛇形）或电缆与支架之间的摩擦力（水平蛇形）后，使蛇形敷设的波浪形状改变而吸收热膨胀。由电缆重力产生的纵向力或电缆与支承架之间的摩擦力与蛇形敷设波浪形的节距长度  $L$  的平方和电缆单位长度的重量成正比，而与波形的宽度  $B$  成反比。改变蛇形敷设形状的力与电缆的弯曲刚度、膨胀系数和温度成正比，而与波形的宽度  $B$  成反比。由此可知，对给定的电缆而言，缩短波形的节距和增加波形的宽度都可获得更好的吸收热膨胀的效果。

（王焜明）

diantan shujing fushe

电缆竖井敷设 (cable shaft installation)

将电缆敷设在竖井中的一种电缆安装方式。主要用在水电站及高层室内变电所作为输电线路出线的竖井中，或者用在较深层电缆隧道的出口竖井中。

电缆竖井一般为钢筋混凝土结构。按电缆敷设方法和电缆安装位置的不同，在竖井内设有工作平台、上下工作梯、起重及牵引电缆用拉环等设施。竖井敷设的特点是：①固定电缆的金具安装在竖井的内壁上，但电缆的夹具须谨慎选择。夹具压力过紧会轧坏电缆的金属套和绝缘，过松则电缆会因自重而下沉。负荷较大的单芯电缆常采用电缆蛇形敷设，并采用非磁性材料铸成的电缆夹具。②在竖井中敷设电缆时，需按敷设的方

向采取必要的措施，以防止敷设速度失控。如由高处向低处敷设时，要用钢丝绳绑扎电缆后，利用电缆的自重逐渐松下。也可将电缆盘放在竖井底部，如水电站内电缆竖井敷设时，在竖井顶口用卷扬机将电缆牵引头和绑扎钢丝绳同时提升敷设。③竖井高度在 30 m 以上时，应该选择有牢固的铠装高落差电缆。采用有纵向铠装的高落差电缆时，在竖井内要设电缆锚定装置。④采用油浸纸绝缘电缆或自容式充油电缆时，需采取限制静油压过高的措施，如采用塞止电缆接头减小电缆的静油压，在敷设及接头时要采取措施防止电缆油下淌。

电缆竖井敷设早期主要用在水电站中，以节省土建投资，但其缺点是成垂直形的竖井如果发生火灾，容易扩大。因此在竖井设计时要考虑消防措施，并设有火灾报警及自动灭火装置。

参考书目

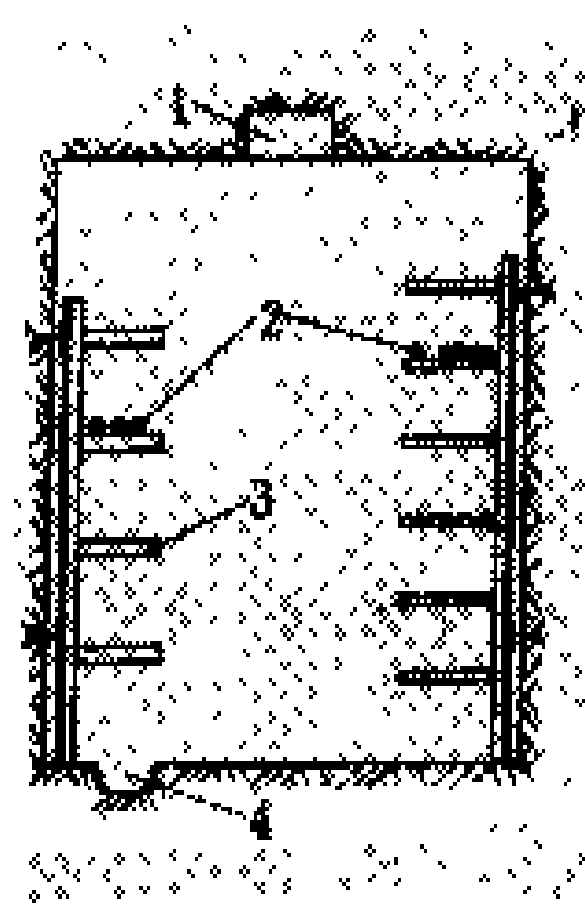
西北电力设计院，电力工程电气设计手册（电气一次部分），北京：水利电力出版社，1990

（李霞娟）

diantan suidao fushe

电缆隧道敷设 (cable tunnel laying)

将电缆敷设在地下隧道内的一种电缆安装方式。用于电缆线路较多（如发电厂或变电所的出线）和电缆线路路径不易开挖的场所（如过江隧道、机场跑道隧道等）。



电缆隧道结构

示意图

- 1—装灯用壁槽；2—电缆；3—支架；4—排水小沟

为敷设电缆线路建筑的专用隧道也称电缆隧道，一般为钢筋混凝土结构，也有砖砌或钢管结构。隧道的高度、宽度除了需满足容纳需要敷设电缆的数量外，还需满足施工时必要的场地要求，因此电缆隧道净高一般不少于 2 m。隧道内壁两侧装有立柱，以便安装多层支架。支架用来搁置电缆，如图所示。电缆隧道通常还设有照明、排水、通风和防火措施及设备。电缆隧道敷设具有方便施工、巡视、检修和更换电缆等较多优点，其缺点是投资大，隧道施工期长，且要求严格防火。

也有将电缆线路敷设在作交通车辆通行等其他用途的隧道内，常将电缆架设在这类隧道的底层通风间隔中。由于这类隧道中安装的管线较多，相互间都有一定的制约，在中国通常并不采用。

敷设在隧道中的电缆，最初因为隧道深度较浅，一般电缆都能使用。由于城市建设的发展，地下管道、地下建筑增多（如地下铁路、地下车库等），建设电缆隧

道就有往深处发展的趋势，当使用粘性浸渍纸绝缘电缆时，电缆油有下淌的危险，因此敷设在隧道中的电缆都有改用固体挤压聚合电缆的趋向。

(李霞娟)

dianlan xianlu dianqi canshu

**电缆线路电气参数** (electrical parameters of cable circuit) 主要有导体的交直流电阻、电缆电容、电缆阻抗以及波阻抗等。

**交直流电阻** 包括导体的直流电阻、交流电阻、等效交流电阻以及铅套和加强层的直流电阻值，主要用于电缆线路载流量、阻抗的计算。

**导体直流电阻** 电缆线路在施加直流电压时的电阻值。用于测寻线路故障或计算交流电阻。直流电阻与导体所用材料的电阻率和环境温度有关，它们之间的关系可用下式表达

$$R_{dc} = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta_c - 20)] \quad (1)$$

式中  $R_{dc}$  为电缆导体的直流电阻， $\Omega$ ； $R_0$  为在  $20^\circ\text{C}$  时电缆导体的直流电阻， $\Omega$ ； $\alpha_{20}$  为以  $20^\circ\text{C}$  作基准的电缆导体的电阻温度系数， $^\circ\text{C}^{-1}$ ； $\theta_c$  为电缆导体的工作温度， $^\circ\text{C}$ 。

**导体交流电阻** 电缆线路在施加交流电压时的电阻值。主要用作计算导线的发热损耗和阻抗等。当导体通过交流电流时，由于受到自身的集肤效应和回路电流的邻近效应的影响，使得其交流电阻值比直流电阻值有所增加，它和直流电阻的关系可用下式表达

$$R_{ac} = R_{dc}(1 + Y_s + Y_p) \quad (2)$$

式中  $R_{ac}$  为电缆导体的交流电阻， $\Omega$ ； $Y_s$  为集肤效应系数； $Y_p$  为邻近效应系数。

**导体等效交流电阻** 导体的交流电阻与由金属护套损耗折算成交流电阻增加值之和，用于计算电缆的载流量。当金属护套内无电流或电流很小时，等效交流电阻就是交流电阻。

**铅套和加强层的直流电阻** 充油电缆在运行时，其铅套和加强层在线路的两端连接在一起，因此合成电阻为两者的并联电阻值。加强层的电阻可假定近似地等于一个等效圆筒体的电阻值的两倍，该等效圆筒体的材料与加强层的材料相同，圆筒体单位长度的重量与单位电缆长度上加强层的重量相同，圆筒体的内径与加强层的内径相同。

**电缆电容** 可分为：①单芯电缆导体对金属套的电容；②三芯电缆导体一芯对其它二芯间及金属套间合成电容；③金属套对大地的电容。其中①、②项主要用于计算无功补偿和载流量，而③项用于波阻抗的计算。

**单芯电缆电容** 单芯电缆、分铅型电缆和屏蔽型电缆等的导体多数制造成与金属套的同心圆形，电容

的计算可用下式表达

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \frac{r_2}{r_1}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中  $C$  为电缆的正序、负序或零序电容， $\text{F/km}$ ； $\epsilon$  为电缆绝缘的相对介电常数； $r_2$  为绝缘层的外半径， $\text{mm}$ ； $r_1$  为导体的外半径， $\text{mm}$ 。

**三芯电缆电容** 三芯电缆如带绝缘电缆的导体多数制造成扇形或椭圆形，电容的计算，比较复杂，常以电缆实物测试而后换算成电缆电容。

**电缆阻抗** 分为正负序阻抗和零序阻抗，用于计算电力系统的短路电流或感应电压。

**正负序阻抗** 电缆导体的交流电阻和电缆三相间感抗的相量和。电缆线路由于排列、并列的条数或金属套的接地方式不同，感抗的计算并不相同。

**零序阻抗** 电缆零序电流的回路电阻与部分以大地作回路的三相感抗的相量和。由于电缆线路金属套的接地方式的不同、并行线路的差异以及大地电阻率的不同，很难用计算方法得出零序阻抗的精确数值，因此常以实测数据作为电缆线路的零序阻抗参数。

**波阻抗** 分为电缆导体对金属护套的波阻抗和金属护套对大地的波阻抗两种，作为电缆线路在内、外过电压作用时计算电缆绝缘或护层瞬时过电压用。波阻抗的计算可用下式表示

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

式中  $Z$  为导体（或金属护套）的波阻抗， $\Omega$ ； $L$  为导体的自感， $\text{H}$ ； $C$  为导体（或金属套）的电容， $\text{F}$ 。

金属套的电容在大地电阻率较小（如电缆敷设在水底或敷设在冷却水管中）时，可近似地用下式计算

$$C_1 = \frac{\epsilon_1}{18 \ln \frac{r_4}{r_3}} \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中  $C_1$  为金属套电容， $\text{F/km}$ ； $\epsilon_1$  为电缆外护层的相对介电常数； $r_4$  为金属套的外半径， $\text{mm}$ ； $r_3$  为外护层的外半径， $\text{mm}$ 。

**参考书目**

郑肇骥，王焜明主编，高压电缆线路，北京：水利电力出版社，1983

(王焜明)

dianlan xianlu jishu ziliao

**电缆线路技术资料** (cable circuit technical records)

有关电力电缆线路建设和运行的全部文件和技术资料。用以分析处理电缆线路在运行中出现的问题和确定需要采取的措施。建立电缆线路技术

资料是电缆线路运行维护的重要工作之一。每条电缆线路的技术资料通常包括原始资料、施工资料和运行资料三类，此外还有各条电缆线路的共同性资料。

**原始资料** 电缆线路施工前的有关文件和图纸资料。它是保证电缆线路质量和合法化的依据。原始资料包括：计划任务书、电缆线路设计书、线路路径许可证、电缆出厂质量保证书以及与沿线有关单位的协议书等。

**施工资料** 敷设电缆线路和安装电缆接头或电缆终端的现场书面记录和图纸，作为日后运行工作中的必要依据。电缆线路属于隐蔽工程，能否安全运行，很大程度决定于施工质量，这就要详细记录有关安装资料。例如电缆线路发生故障，需要找到精确的故障部位，除了依靠测试仪器外，还需凭借准确的电缆线路路径竣工图，才能事半功倍地迅速修理故障。施工资料有电缆线路路径图、电缆接头和终端的装配图及安装工艺、施工日期、安装人员姓名和竣工试验报告等。

**运行资料** 电缆线路投入运行后，有关运行维护工作的书面记录。逐年累积各条电缆线路的运行资料，不但可总结电缆网络薄弱环节之所在，且可对照运行管理水平是否有所提高。运行资料有预防性试验报告、电缆故障修理记录、巡视缺陷记录等。

**共同性资料** 如电缆线路总图、电缆断面图、电缆接头和终端的装配图以及有关土建工程的结构图（如排管、人井、隧道布置图）等。

（屠俊良）

dianlan xianlu jiaojie shiyan

**电缆线路交接试验** (tests after installation of cable line) 电力电缆线路安装完毕后，施工单位为了向运行单位验证线路的电气性能是否达到设计的要求和是否符合安全运行的需要而做的电气试验。其目的是为了发现敷设电缆线路和制作电缆接头、电缆终端时所造成的缺陷，其内容主要有耐压试验、泄漏电流试验和核相试验，但按电缆结构和电缆线路的重要性不同，常增加其它试验，如导体的直流电阻试验、绝缘电阻试验、参数试验、油样试验、油流试验和交叉互联系统试验等。

**耐压试验** 在等于或高于运行电压下电缆绝缘工作强度的电压试验。用以发现敷设电缆时由于施工不当给电缆造成的机械和绝缘的损伤，在制作电缆接头或电缆终端时由于安装工艺或材料等问题造成的质量不合格等现象。敷设于地下水位较高的地区，在交接试验中作耐压试验时能发现部分电缆的制造缺陷，例如铅套有砂眼等。

耐压试验的试验电压按电缆运行电压的不同，常

以相间电压的 2.5~6 倍直流电压，逐相试验 5~15 min，但高压塑料绝缘电缆也有时用交流系统运行电压进行耐压试验。

金属套或外屏蔽层对地有绝缘要求的电缆线路，如护层单点接地或交叉互联的电缆线路，也用直流高电压对外护套进行耐压试验。

**泄漏电流试验** 测量电缆线路在试验电压时的泄漏电流值的试验。用以判断电缆线路的绝缘是否完好。试验时，将试验电压逐渐升高，根据其相应的泄漏电流与耐压试验前后的泄漏电流的比值，可以判断电缆线路的绝缘是否异常。

泄漏电流常包括电缆线路绝缘内部的吸收电流及导电电流和电缆终端表面的外部漏电电流。因此常在电缆线路的两端各装上屏蔽护环，以获得电缆线路内部绝缘的泄漏电流值。

**核相试验** 核对电缆线路一端的相序和另一端的是否一致的试验。以防止电缆线路在并入系统投入运行时发生相间短路事故或造成受电端相序错误。核相试验兼有对电缆线路导体的连续性校核的作用。

**直流电阻试验** 测量电缆线路每相导体直流电阻值的试验。用以发现电缆导体间的电气连接是否良好，避免在运行中发生导体接点事故。

**绝缘电阻试验** 测量电缆线路每相线芯绝缘电阻值的试验。电压较低或较短的不重要电缆线路，常以绝缘电阻试验代替耐压试验。在耐压试验的前后，有时也作绝缘电阻试验，判断电缆线路绝缘在耐压试验前后的变化，兼有保护耐压试验设备在电缆绝缘突然击穿时不被损坏的作用。

**参数试验** 测量电缆线路的交流电阻、电容值和损耗功率，由此计算得正、负和零序阻抗的试验。用作电力系统短路电流的计算和整定继电保护的定值。电缆线路电容值是经消弧线圈接地系统计算补偿量的依据之一，该系统内的电缆在投运前必须测量其电容值。

**油样试验** 测量充油电缆线路油样的交流击穿电压和介质损耗因素的试验。用以评定充油电缆的绝缘是否完好合格。油样试验通常在安装一只电缆接头或电缆终端完成后立即试验，防止不合格的电油渗入电缆绝缘内部。

**油流试验** 测量充油电缆线路油道是否畅通的试验。用以证实在安装电缆接头或电缆终端时未曾堵塞油道。

**交叉互联系统试验** 金属套或外屏蔽层对地绝缘的电缆线路（如超高压单芯电缆线路）在交接试验时测量交叉互联系统接线是否正确的试验。投运后带负荷测量金属套或外屏蔽层的相间电压、各相内的电流和



接地回路中的电流,以证实交叉互联接线完整和正确。  
(屠俊良)

dianlan xianlu kongzhi dianlan

**电缆线路控制电缆** (control cable of power cable line) 电力电缆线路的二次回路中对电缆线路的运行情况进行监视、启闭信号和控制作用的辅助电缆。电缆线路的控制电缆有二类:普通型控制电缆,适用于 35 kV 及以下的电缆线路;特殊型控制电缆,适用于 110 kV 及以上的电缆线路。

控制电缆的结构不同于导引电缆,主要是由于监控的对象类别众多,如电力电缆或电缆接头的温度、护层绝缘,充油电缆的油压及其人井、隧道等附属设备的环境温度、配电电源、积水情况等,因此控制电缆需要很多线芯(有时也包括导引电缆的线芯在内),共用一条电缆将信号集中输送到由值班人员监控的发电厂或变电所的中央控制室。也有的安装自动启闭装置进行自控,如电缆隧道内温度过高时启动排风装置降温,发生火警时启动消防设施自动灭火,积水太多时启动水泵排水等。

当控制电缆与电力电缆平行敷设时,对防止感应电压的危害所采取的措施与导引电缆的相同。多芯控制电缆的备用芯有时可用作检修维护工作时的通信线,也可将其两端接地,加强屏蔽效果。为了均衡控制回路二芯间的感应电势,常采用双芯绞合对称结构的控制电缆。

(许精潜)

dianlan xianlu lujing xuanze

**电缆线路路径选择** (cable route selection)

比较从电源点到受电点的电缆线路地下通道在经济上最合理的方案。电缆线路路径的选择不但要满足近期工程的需要,而且要符合城市和电力远景发展规划,在技术和经济上获得最佳经济效益。因此,电缆线路路径选择需考虑到电缆安装方式、电缆的类型和路径的道路结构。较长的电缆线路有时由于电缆平行根数的密集程度不同,则用多种方式安装。

**路径与安装方式** 由于电缆安装的方式不同,路径的选择有不同的要求。对于电缆线路不密集、道路多弯曲、交通不频繁的街道,多采用直埋敷设。对于电缆线路较多(一般在 10~20 根间)、道路少弯曲、交通频繁的路径,多采用排管敷设。对于地面荷载轻、地下管道交错少的路径,多采用电缆沟敷设。对于电缆线路高度密集地段(如发电厂和大型变电所)或路径难度较大区段(如穿越机场跑道和江底),多采用隧道敷设。

市区电缆线路的路径与安装方式,应与城市其他

地下管线统一安排。中国的《城市电力网规划设计导则》中规定,电缆敷设方式应根据电压等级、最终数量、施工条件及初期投资等因素确定,可按不同情况采取以下方式:①直埋敷设,适用于市区人行道、公园绿地及公共建筑间的边缘地带,是最经济简便的敷设方式,应优先采用;②电缆沟敷设,适用于不能直接埋入地下且无机动车负载的通道,如人行道、变电所内、工厂厂区内等处所;③排管敷设,适用于电缆条数较多,且有机动车等重载的地段,如市区街道、穿越小型建筑物等;④隧道敷设,适用于变电所出线及重要街道,电缆条数多或多种电压等级平行的地段;⑤电缆路径需要跨越河流时,尽量利用桥梁结构;⑥海底敷设方式需根据具体工程特殊设计。

**路径与电缆类型** 电缆线路的类型可归纳为硬管型(如钢管电缆)、软管型(如油浸纸绝缘电缆、固体挤压聚合电缆)及悬挂型(如架空电缆)三类。由于电缆的刚性差异,对路径有不同的要求。

**硬管型** 多数硬管型电缆线路的安装方式,是先将管道埋设在地下,其后将电缆线芯拉进管道内。为了减少电缆接头数量,要求尽可能增长拉入长度,而拉入长度又决定于线路弯曲度,因此路径应尽可能为直线。必须弯曲时,其弯曲半径约在 100 m 左右。这些条件制约了路径的选择。硬管型电缆通常适用于公路或成直线的道路。

**软管型** 其路径不如硬管型要求高,即使弯曲较多的道路,由于装盘长度短(约 200~300 m),也便于安装。此外遇其它地下管线时便于交叉。因此软管型电缆线路的路径选择,比较灵活。

**悬挂型** 架空电缆或电缆架空敷设都可以不受道路的方向制约,能充分利用空间,按最短直线距离安装。因此悬挂型电缆线路的路径选择比软管型更灵活,尤其适宜用于临时性工程。

**道路结构与路径** 电缆线路的路径选择常决定于道路的结构,如路面和路基的种类。此外城市中的各种地下管线较多,如水管、煤气管、电话电缆等,要考虑彼此间的相互关系。

**道路路面** 电缆线路为了便于安装和日后维修,要求路面容易开挖,并能承受一定的载重。人行道路面常是最佳选择,但这种选择对其它管线同样适用,因此,通常城市中的地下管线布置为:一侧人行道下是电力电缆、自来水管,另一侧为电话电缆和煤气管道走廊,以防止相互影响。

**道路路基** 电缆线路路径的路基最理想的是沉积层或砂土层,不选择岩石、河浜复填地段,防止路基不均匀沉降对电缆线路造成影响。用工业或生活垃圾填充的路基,则用中性软土更换,以防止对电缆金属套的

化学腐蚀。

(陆德综)

dianlan xianlu sheji

**电缆线路设计** (cable circuit design) 电缆线路工程建设的前期设计工作。包括电缆线路路径选择、电缆选型以及相应的有关计算,如电缆线路的载流量及感应电压的计算、电缆线路电气参数及电缆敷设计算,若电缆线路采用充油电缆,还须进行充油电缆油路分段和电缆供油装置允许供油压力计算。

电缆线路工程的造价远大于架空线,而改动的灵活性却不如架空线。改动电缆线路,还会直接使电缆线路绝缘层再次弯曲,从而影响电缆寿命。因此,电缆线路建成后要有一个相当长的稳定时期。电缆线路设计不但要满足近期计划,尤其要符合远景规划的要求。

**载流量** 在选定的使用条件下,电缆线路导体所通过的电流在导体上产生的热量能通过电缆的绝缘层及其周围媒介及时散发,使电缆绝缘层的温度不超过允许长期工作温度时的电流值。载流量是作为电缆线路可以安全输送多少电能的依据。

电缆绝缘层的允许工作温度,有长期和短时之分。用长期工作温度计算得的电流称作额定电流,用短时工作温度计算得的电流称作紧急过载电流。另外,在电力系统发生故障时,电缆线路常通过事故电流,持续时间虽短,但需校核电缆导体和事故电流的回路导体的短路电流热稳定性。

**紧急过载电流** 电缆线路在电力系统故障时允许数小时大于额定电流运行的电流值。短时工作温度高于长期工作温度,将影响电缆绝缘的寿命,故只有在不得已时才允许过载运行。

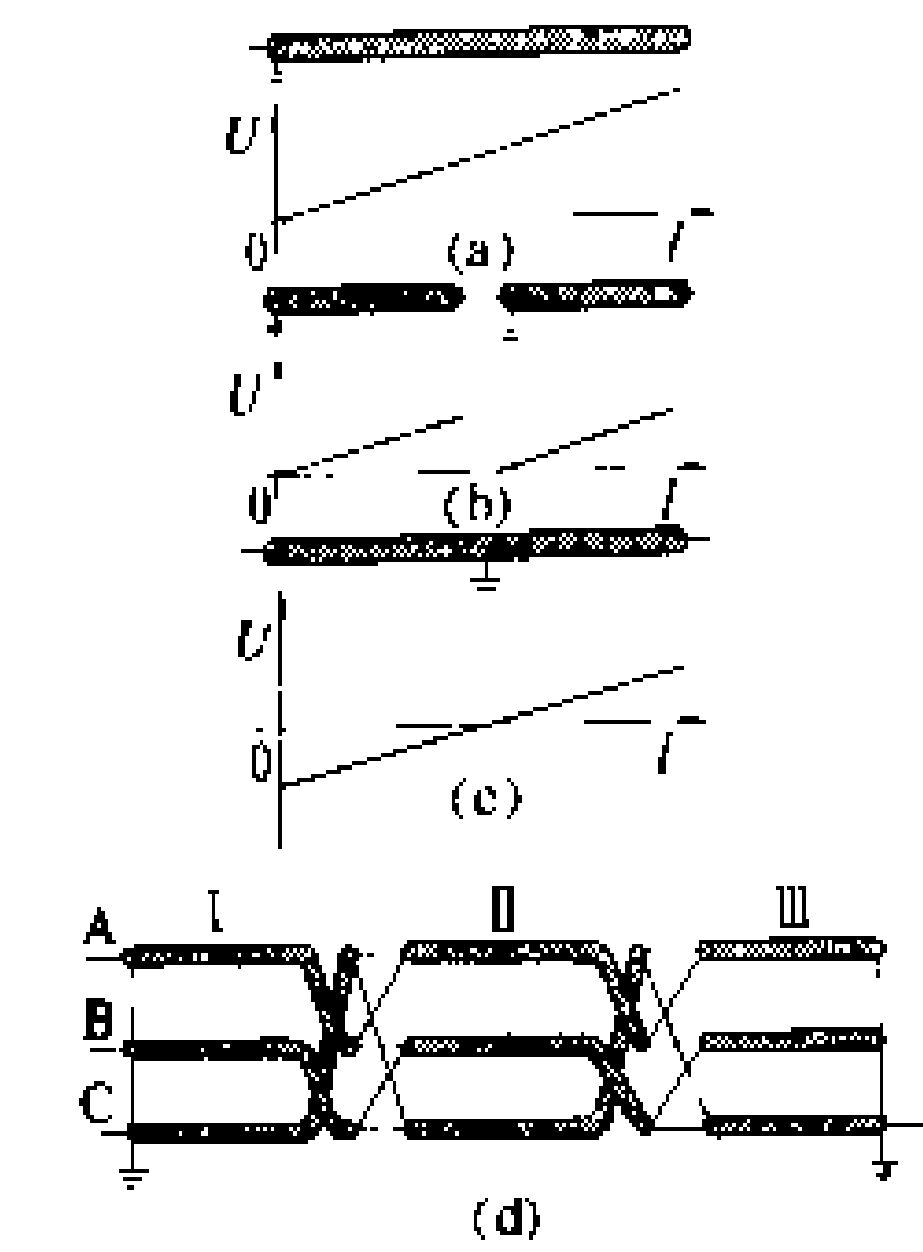
电缆线路在运行中有时并不满载,即绝缘层未达到允许长期工作温度。当电力系统发生故障时,也允许数小时大于额定电流的电流值,这是利用导体电流增加和绝缘层的温度升高是非线性关系,即由发热曲线确定而并未超过绝缘层允许长期工作温度,对电缆绝缘寿命并无影响,这时的导体电流称作过载电流,有时也称为紧急过载电流。

**短路电流热稳定性** 事故电流通过电缆使电缆的导体和金属套温度升高,如果温度低于导体或金属套的允许短时温度,这时电缆称作具有足够短路电流热稳定性;反之称作热稳定性不够。电缆导体截面的选择,常由负荷电流决定,但在短路容量大的电力系统中,有时也由短路电流热稳定性决定,如发电厂的厂用电缆。

**感应电压** 电缆导体通过电流时在其周围平行的邻近导体上所感应的纵向电动势。邻近的导体如果是

电缆金属套,这时的感应电压称作护层电压;如果为

通信电缆则称作干扰电压。也有利用平行导线上的纵向感应电动势,将两端接地后,使纵向感应电动势转化为反向电流的,这个平行导线称为回流线(见电缆电磁屏蔽)。计算感应电动势,是为了确定电缆护层互联方式、干扰电压是否在允许值内、要不要采取必要的屏蔽措施等。电缆护层的互联方式通常有单点互联、连续互联和交叉互联三种。



电缆护层的互联方式和感应电压

(a) 护套未断开的单点互联;(b) 护套在中间断开的单点互联;(c) 护套在中间接地的单点互联;(d) 电缆换位护套交叉互联(全线护套合成电压接近于零)

**单点互联方式** 电缆线路的金属套仅在线路的一处(如线路的一侧或直线接头处)相互连接并接地的电缆护层连接方式,常用于长度为1~2盘的单芯电缆线路,如图(a)、(b)和(c)所示,图中 $U$ 为护套上的感应电压, $l$ 为电缆线路长度。

**连续互联方式** 电缆线路的金属套在线路两侧相互连接并接地的电缆护层连接方式,主要用于海底电缆线路。

**交叉互联方式** 电缆线路的金属套在大段线路的两侧相互连接并接地,在小段的绝缘接头处将不同相的金属套跨越相互连接的电缆护层连接方式,主要用于长度为3盘及以上的电

(陆德综)

dianlan xianlu waili pohuai fanghu

**电缆线路外力破坏防护** (cable external damage protection)

防止电缆线路在外力的作用下造成损坏的方法及措施。外力损坏的原因有机



加强督促与教育。运行部门要对每次外力破坏进行分析讨论，找出不足之处，及时采取对策。

电缆运行人员要经常督促各建设单位和公用事业单位遵守执行政府部门颁发的有关保护地下管线的管理办法，并与这些单位建立经常性的联系，及时了解各地段的挖土施工情况，以便派人配合守护电缆。

在电缆线路附近进行机械挖掘土方时，必须采取有效的保护措施，可先用入力将电缆挖出并加以保护后，再根据操作机械设备及人员的条件，在保证安全距离的情况下进行施工。施工过程中露出的电缆，在进行覆土前，电缆运行人员要仔细检查电缆是否受到损伤。

在水底电缆线路防护区内，发现危及水底电缆安全的情况时，要求守望人员及时通知对方和水域管辖的有关部门，并尽可能采取有效措施，以避免损坏水底电缆。

(屠俊良)

dianlan xianlu xunshi jiancha

**电缆线路巡视检查 (cable route inspection)**

为提高电缆线路的安全可靠性，运行人员对管辖范围内的电缆线路按照现场运行规程的规定进行的经常性巡视检查。

电缆线路的巡视检查由专人负责，并根据具体情况制订巡视检查的项目和周期。较大的电缆网络通常要划区分块进行巡视检查。穿越河道、铁路的电缆线路，以及安装在杆塔上、桥梁上和敷设在水底的电缆，都较容易受到外力损伤，对它们的巡视检查周期需相应缩短。对于敷设在隧道内的电缆，要定期检查是否有油渗漏或自支架上滑落等现象，以及自动排水装置是否良好，照明是否正常。

运行人员对超高压电缆线路除了作经常性的巡视检查外，在电力系统发生故障而电缆线路通过大电流后，对装设在电缆线路上的护层保护器应进行检查，查看是否受到损坏。

充油电缆线路的巡视检查，主要是查看压力箱、电缆本体、阀门及油管路是否有油渗漏，油压是否正常，以及线路上的塞止接头井内自动排水装置是否良好。

电缆线路的地面上不能堆置瓦砾、矿渣、建筑材料、笨重物件、酸碱性排泄物或砌堆石灰坑等，因为这样既容易压伤电缆，妨碍紧急修理，而且在装卸重物、挖土或打地桩时，也极易直接损伤电缆。

对于在施工中挖出的电缆本体和电缆接头，运行人员要设法加以保护，并在其附近设立警告标志，提醒施工人员注意和防止外人误伤电缆。

巡视检查中所发现的缺陷，运行人员要立即向主管部门报告，以便采取对策，及时处理，并作好记录，

归入该条电缆线路专档内。

(屠俊良)

dianlan xianlu yunxing weihu

**电缆线路运行维护 (cable circuit operating and maintenance)**

电缆线路投入运行后，为保持电缆设备始终在良好的状态和防止电缆事故突发的可能性所做的日常具体工作。电缆线路运行维护着重要做好负荷监视、电缆金属套腐蚀监视和绝缘监督三个方面工作，主要项目有建立电缆线路技术资料，进行电缆线路巡视检查、电缆预防性试验，防止电缆外力破坏，分析电缆故障原因、电缆故障测寻和电缆故障修理等。电缆线路运行维护按电缆网络的事故率和事故原因，根据不同地理环境，还需增添特殊内容，如诱杀白蚁、人井水样分析、水树枝切片检查和带电测量并监视绝缘等。

**负荷监视** 利用各种仪表测量电缆线路的负荷电流或电缆的外皮温度等，防止电缆绝缘超过允许最高温度而缩短电缆寿命。一般电缆线路根据电缆导体的截面积、绝缘种类等规定了最大电流值，在配电盘的电流表上用红线标出，24h 读测或记录，作为主要负荷监视措施。如果用一只电流表记录多根并行电缆线路的电流，还需用钳形电流表带电测量每条电缆线路的各相电流。对重要的电缆线路在电缆较密集的地段，用热电偶装在电缆表面以监视温度，如果温度超过允许值时（例如英国推荐为 50℃），需采取冷却水管降温或更换周围泥土为膨润土等措施。

**腐蚀监视** 以专用仪表测量邻近电缆线路的周围土壤，如果属于阳极区，则应采取相应措施，以防止电缆金属套的电解腐蚀。电缆线路周围润湿的土壤或以生活垃圾填覆的土壤，电缆金属套常发生化学腐蚀和微生物腐蚀，但最严重的是杂散电流所造成的电解性腐蚀。根据测得阳极区的电压值，选择合适的阴极保护措施或排流装置。

**绝缘监督** 对每条电缆线路按其重要性，编制预防性试验计划，及时发现电缆线路中的薄弱环节，消除可能发生电缆事故的缺陷。金属套对地有绝缘要求的电缆线路，一般在预防性试验后还需对外护层分别另作直流电压试验，以及时发现和消除外护层的缺陷。

**压力监视** 充油和充气电缆，要有油压和气压的监视装置，以及时发现和消除引起油压或气压降低的因素和缺陷。

(屠俊良)

dianlan xuanxing

**电缆选型 (selection of cable type and size)**

设计电缆线路或选用电缆时对其型号和规格的选择。主要是导体材料和截面、绝缘种类和护层种类的选择。

导体材料和截面的选择 110 kV 及以上电压等级的电力电缆，励磁回路、高温或易爆场所以及发电厂厂用电回路的电力电缆，要求采用铜导体。其它场合所用电缆视具体情况选用铝或铜导体。

为使电缆在运行时，导体温度不超过允许工作温度和短路温度，要求根据电缆线路的负荷电流和短路电流在电缆的标称截面系列中选择合适的截面。对输配电电缆线路，主要按负荷电流和电缆导体的长期允许温度选择其截面。根据负荷电流的持续时间，负荷又可分为恒定负荷和周期性负荷，并根据这两种负荷类型选取相应的截面。对长电缆线路，除了按负荷电流选择截面外，还要校核该负荷电流产生的电压降是否在允许范围内，如超出允许范围，则选择高一档的截面。在发电厂内使用的电缆，负荷电流不大时，其截面大小将取决于短路容量。

绝缘种类的选择 油浸纸绝缘电缆的生产和使用历史最长，其优良的电性能为大家所公认，几乎各种场合均能使用。但这种电缆的制造工序多，工艺复杂，因而成本较高。随着塑料工业的发展，出现了许多新的合成绝缘材料，并且很快就应用于电缆制造业，生产出了多种固体挤压聚合电缆。虽然这些电缆的性能不如油浸纸绝缘电缆优良，但成本低，重量轻而柔软，生产工艺简单，价格便宜和安装方便，因此在 35 kV 及以下电网中的应用日益广泛，在很多国家几乎全部替代了油浸纸绝缘电缆。

(1) 380 V 线路用电缆。在一般场所多选用聚氯乙烯电缆。聚氯乙烯电缆在火灾燃烧时会产生大量黑烟和氯化氢等强腐蚀性气体，故在火电厂、核电站、石油平台、高层建筑、公共场所和船舶上不宜采用。

(2) 10~35 kV 电缆。中国大都选用不滴流电缆或交联聚乙烯电缆，在其他国家则多选用交联聚乙烯电缆。由于乙丙橡胶电缆不但电性能和热性能都比较好，与交联聚乙烯电缆相似，而且柔软性、耐 X 射线辐照和抗水树枝性能好，因此适宜在矿井、水下和核电站内使用。其缺点是价格较贵和介质损耗因数较大。

(3) 110 kV 及以上电压等级的电缆。通常以自容式充油电缆或钢管充油电缆为主要选用品种。110 kV 及以上交联聚乙烯电缆与充油电缆相比，虽然不需要供油系统，但其接头和终端的安装技术复杂，要求安装现场的空气非常清洁，要采取净化措施。此外，交联聚乙烯的体积膨胀系数大、压缩模量小所带来的一些热机械性能问题尚需研究解决。因此，对 110 kV 及以上线路，可根据具体情况选用自容式充油电缆或交联

聚乙烯电缆。

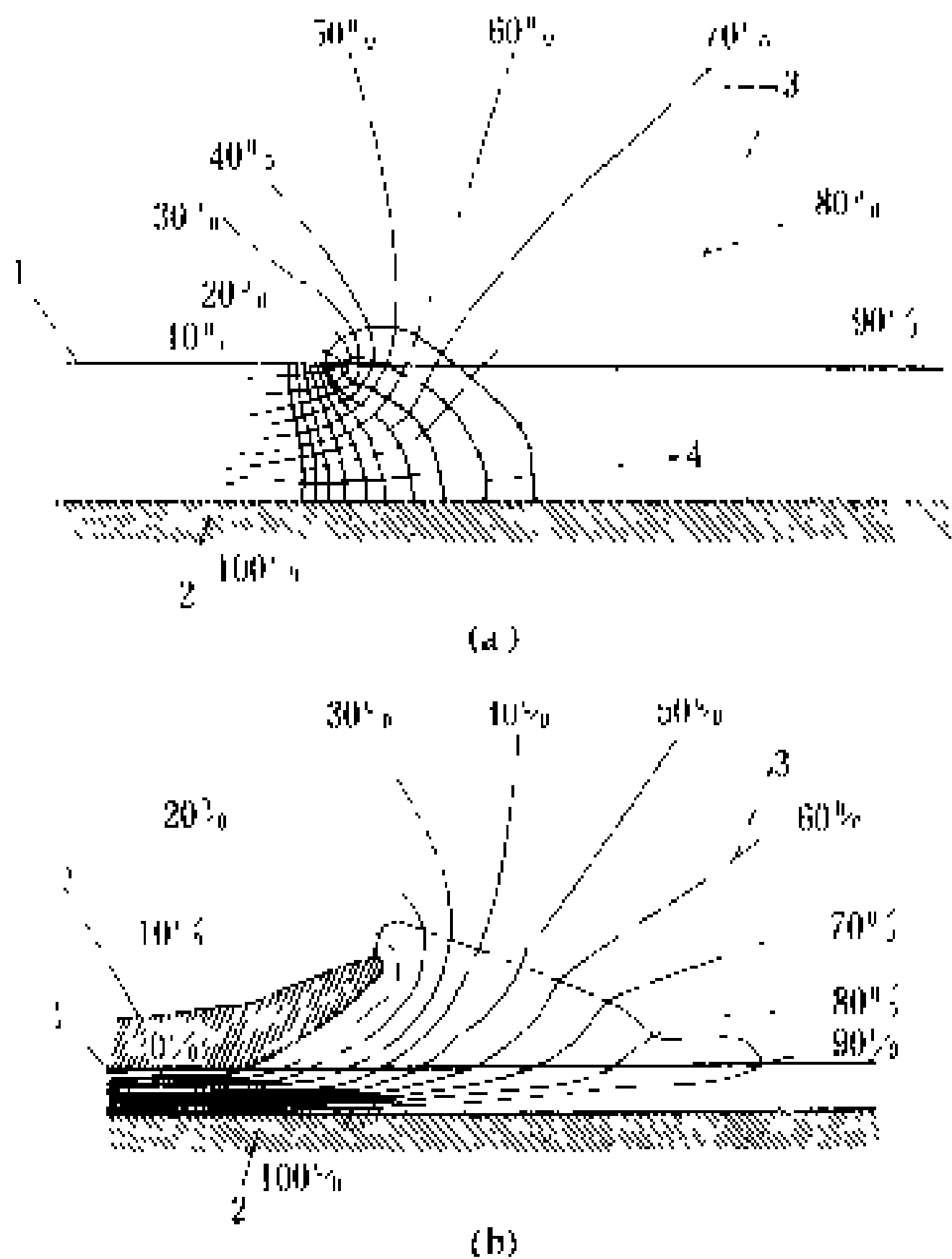
护层种类的选择 对明敷的油纸绝缘电缆要选用裸钢带铠装，在易受腐蚀的环境中或在地下直埋敷设时要选用钢带外有外护套的电缆。在水下敷设或电缆会受到较大拉力时要选用钢丝铠装电缆。有金属套的电缆敷设在易受振动的场所时要选用铝套电缆。交联聚乙烯电缆敷设在水下，或者电压等级为 63 kV 及以上时，要选用有防水金属套的电缆，在水下敷设或受到较大拉力时也要选用钢丝铠装电缆，在其它场合不一定都要求铠装。

(王焜明)

dianlan yinglizhui  
**电缆应力锥 (cable stress relief cone)**

电缆终端或电缆接头内用绝缘带绕包或套在电缆绝缘芯上似橄榄状的橡塑模件，使电缆绝缘直径逐渐扩大成锥状体，以控制电缆轴向应力的构成件。10kV 及以上电压的电缆终端，不论屏蔽型电缆、分铅型电缆或单芯电缆都装有应力锥。

在电缆接头或终端中，为了使导体与导体或其它电气设备连接，需将电缆金属套、绝缘层割断和剥去，待导体连接完后，再恢复绝缘层和金属套。由于无法保持接头或终端处绝缘层厚度和金属套与电缆本体的结构相同，在接头和终端中都存在有轴向应力。为了控制轴向应力，在允许范围内，利用逐渐减小电容的原理，即将电缆原有的绝缘厚度逐渐增加，使绝缘表面的



电缆接头或终端处的电压分布等位线示意图

(a) 没有应力锥；(b) 装有应力锥  
1—金属屏蔽层；2—导体；3—等电位线；4—电力线；  
5—电缆应力锥

电场强度逐渐递减,疏散电力线密度,提高过渡界面的游离电压。图(a)为没有应力锥的电缆接头或终端处的电压等位线分布情况,图(b)为有应力锥时的电压等位线分布情况。

为了简化施工,也有采用应力管代替应力锥的,它是用非线性电阻材料做成的管子,紧套在电缆绝缘层表面,或用非线性电阻材料做成绝缘带绕包在电缆绝缘表面。电缆运行时,应力管层中产生一个极小的电流,其表面相应有一个线性压降,从而减小了电缆的轴向应力。另一种应力管是采用高介电常数材料,其作用原理是利用电力线在不同介电常数材料中的折射现象来控制轴向应力。应力管不像应力锥需要较大的绝缘厚度,简化了现场安装工艺,并缩小了电缆终端的外形尺寸,便于同其他紧凑的设备连接,因此适用于极紧凑的场所。在10~35 kV组合电器的电缆终端中,大多采用应力管,而在35 kV以上电压等级的电缆终端中,也在逐渐采用。

参考书目

Bungay E M G, McAllister D. Electric Cables Handbook. BSP Professional Books, 1990

(陆德斌)

dianlan yufangxing shiyan

**电缆预防性试验** (cable HV routine test after operating) 为了防止电力电缆线路在运行中发生绝缘击穿,按照预防性试验规程进行的电气试验。是判断电缆线路能否继续投入运行和预防电缆在运行中发生故障的重要措施。

电缆预防性试验的项目通常包括绝缘电阻测量、直流耐压试验和泄漏电流测量。对于超高压电力电缆线路,则按其绝缘结构的不同,分别做油样电气性能及色谱分析试验和测试护套绝缘电阻,同时测试油压示警系统信号电缆的绝缘电阻。预防性试验的部分试验项目与电缆线路交接试验相似。

在耐压试验中,发现泄漏电流不稳定,或泄漏电流值随试验电压急剧上升,或随试验时间增长有上升现象时,如纯属电缆线路的原因,则可提高试验电压及延长试验时间,但电压不可超过交接试验标准的规定值。

根据试验结果被列为不合格但经过综合判断允许在监视条件下投入运行的电缆,其试验周期应比标准规定的有所缩短,以防电缆在运行中发生绝缘击穿事故。

进行电缆线路的绝缘试验时,要尽可能将连接在一起的隔离开关、支柱绝缘子等其他设备分离开来单独试验。电缆与成套设备连接在一起难以拆开时,试验电压值须考虑相连设备的绝缘水平和试验标准,但这

些设备都不宜使用直流耐压进行试验。

由于城市配电网的发展,中小型化紧凑型的配电装置已被广泛应用,与这些设备连接的电缆往往与配电装置的环氧树脂电流互感器或绝缘子相连接。因其设计紧凑,在预防性试验时要将电缆与这些设备拆开很困难,多次拆装对这些设备也不利。于是有的规定,凡与此类设备相连的电缆线路不再做预防性试验。交联聚乙烯电缆在直流耐压试验中,对绝缘的损坏有一定的积累效应,为此,有的也规定交联聚乙烯电缆不再做预防性试验,以监视其绝缘电阻变化的方法,来监视电缆的交联聚乙烯绝缘在运行中是否受到机械损伤。

(屠俊良)

dianlan zhimai tushe

**电缆直埋敷设** (cable direct burial laying)

将电缆线路直接埋设在地面下0.7~1.5 m深的一种电缆安装方式。一般用在电缆线路不太密集和交通不太频繁的城市地下走廊。电缆直埋敷设不需要前期土建工程,是一种较经济的安装方式。它的优点是施工时间较短,便于维修,线路输送容量较大。缺点是容易受到机械性外力损坏,更换电缆困难,容易受周围土壤化学或电化学腐蚀。

与公用事业部门的协调和路径的复勘 施工之前必须与城市公用事业部门充分讨论,以便了解有关的规章制度和限制条件,并取得有关部门的同意和取得施工执照或许可证。为了探明沿电缆线路路径上无其它管线及土质状况,需先开挖足够的样洞,并作好记录,以此作为最后确定电缆线路路径的依据。

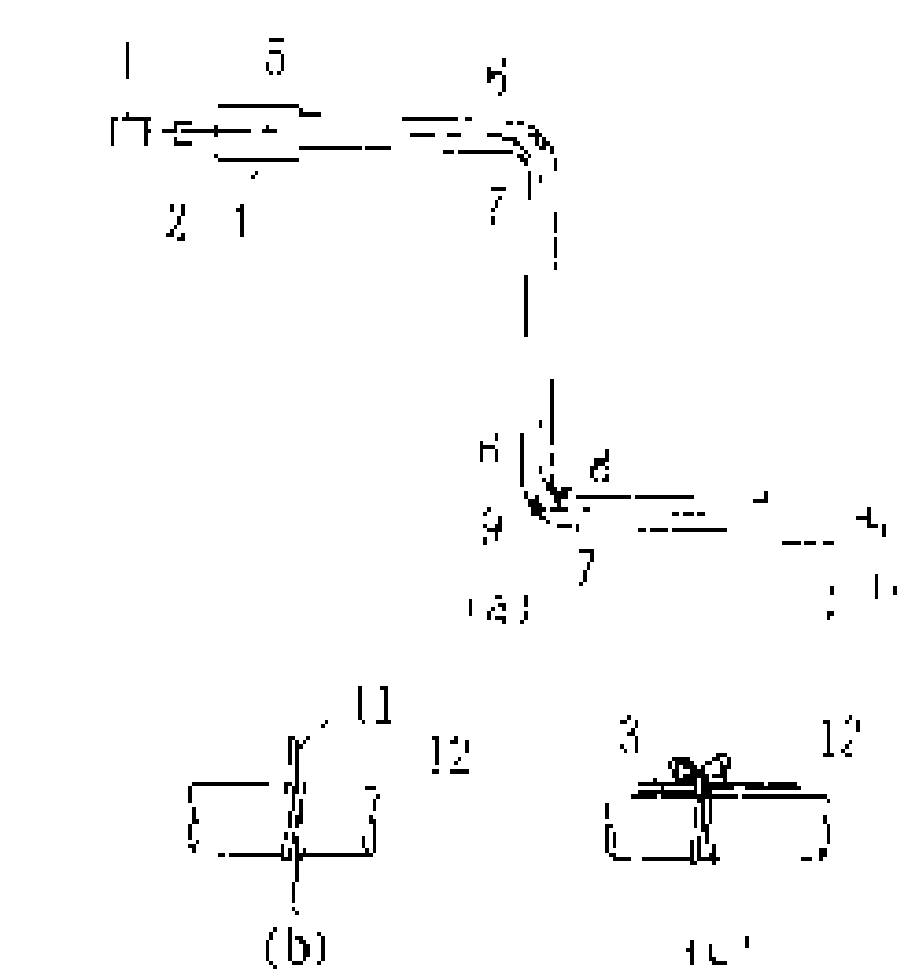
电缆土沟和接头坑 电缆直埋敷设时开挖的电缆土沟与其它管道通常要保持至少300 mm的净距,与热力管道最好保持不小于5 m的净距。电缆土沟的深度取决于电缆的埋置深度。电缆的埋深由路面载重负荷及电缆的散热条件确定。埋置越深,电缆受到的路面荷重压力越小,但散热性能就越差;反之散热性能虽好,但承受压力过大,也可能损伤电缆。因此,一般规定直埋深度在人行道下为0.7 m,在车行道下不小于1.2 m。电缆土沟要挖得比敷设在设计埋深的电缆的底部低75 mm,作为在沟底衬垫一层经过筛选的软质回填土之用。

在安装电缆接头处,电缆土沟要加宽和加深,这一段电缆土沟称为接头坑。一般要求接头外部保护匣的顶部与电缆顶部达到同样的深度,在接头下部还要留有适当的净空以便于制作接头时的操作。为便于接头操作和运行时的散热,两个相邻接头之间的中心距约为电缆中心距的2~4倍。此外,对于单芯电缆两个边相的接头与接头坑壁也要留有间距。故接头坑的宽度

约为电缆沟宽度的 2~3 倍。在制作接头时,为了将接头的外壳穿在电缆上并易于套回到安装位置,在接头的一侧需要相当长度的电缆与接头保持成直线。将三相单芯电缆的三个接头并排布置是最经济的,但为了减少接头坑的宽度,有的也采用三个接头前后错开呈箭头形的布置方式。

电缆牵引 敷设电缆最原始的牵引方法是用人力牵引。目前,在世界上劳动力多而又低廉的许多地方,在敷设长度较短重量又轻的电缆时,人力牵引的方法还在采用,仍不失为一种较为方便和有效的方法。对于长而又重的电缆,需要采用动力机械牵引的方法,常用的有端头牵引、绑扎牵引和电动滚轮牵引三种方法。

(1) 端头牵引。这是最常用的电缆牵引方法。将电缆盘放在电缆沟的一端,在电缆沟的另一端放置卷扬机,在电缆沟底每隔一定距离放置一个滚轮,将卷扬机上的钢丝绳沿电缆沟放在滚轮上,一直到电缆盘处与电缆端头上的牵引端相连接。当卷扬机的鼓轮卷绕钢



绑扎牵引图

(a) 牵引方法示意; (b) 将七股麻绳绑扎在电缆上的方法; (c) 把电缆绑扎在牵引钢丝绳上的方法  
1—电缆盘; 2—钢丝绳小车; 3—牵引钢丝绳; 4—接头坑; 5—把电缆绑扎在牵引钢丝绳上; 6—把电缆从牵引钢丝绳上解下; 7—把电缆重新绑扎在牵引钢丝绳上; 8—拐弯滚轮或滑板; 9—定滑轮; 10—卷扬机; 11—七股麻绳; 12—电缆

力和侧压力将会增大到超过允许值。此时要设法使牵引力不要全部集中作用在电缆的端头,而使之均匀作用在电缆的全部长度上。为此,又发展了绑扎法和电动滚轮法。

(2) 绑扎牵引。如图所示,将电缆盘放在电缆沟的一端,另一端放置卷扬机。在电缆盘的前面放置钢丝绳小车,在小车上装有一盘牵引钢丝绳,其长度至少为被牵引电缆长度的两倍,小车上还设有控制钢丝绳鼓轮

转速的制动器和回收钢丝绳的动力装置。钢丝绳从小车上放出后放在电缆沟内的滚轮上通过电缆沟,然后绕在卷扬机的鼓轮上。在电缆沟拐弯处,钢丝绳经过固定在沟壁上的定滑轮后改变方向。钢丝绳就位后,将电缆端头从电缆盘上拉下,用七股麻绳先将钢丝绳扎结在电缆端头上,然后再将电缆绑扎在钢丝绳上,以后每隔 2m 绑扎一次,边牵引边绑扎。当电缆端头到达拐弯处遇到定滑轮之前,先把电缆从钢丝绳上解下,让钢丝绳通过定滑轮,而电缆则从定滑轮外面通过拐弯处后,再重新把电缆绑扎在钢丝绳上继续向前牵引。如果在拐弯处作用在电缆上的侧压力较大,则要象端头牵引那样设置垂直滚轮或滑板。电缆被牵引就位后,解开绳结并将钢丝绳收回,复绕在钢丝绳小车的鼓轮上,准备牵引下一根电缆。

(3) 电动滚轮牵引。使牵引力均匀分布的另一方法是电动滚轮牵引法。电动滚轮主要由一对转轮和导向轮等部件组成。转轮中的一个由电动机驱动。电缆在这对转轮中通过,利用电缆外护套与两个转轮之间的摩擦力获得向前推进的动力。敷设电缆时,在电缆沟的直线段内每隔 10~20 m 放置一个电动滚轮。在电动滚轮之间,电缆由均匀放置的普通滚轮支承。在拐弯处要增加电动滚轮,以提供电缆弯曲时所需的额外动力。采用类似端头牵引的方法,引导电缆端头由一个电动滚轮推动至下一个电动滚轮。由于有电动滚轮,引导电缆运动方向所需的端头牵引力比没有电动滚轮时的小多了。电动滚轮和导向牵引卷扬机之间,通过相互连接的电气线路同步运转。目前也有以小型履带式牵引机代替电动滚轮,大大提高了牵引力而又不会压扁电缆。

绑扎牵引和电动滚轮牵引的选用,视具体工程而定。绑扎牵引的优点是投资少,牵引力均匀,设备维护简便,牵引速度可以调节。电动滚轮牵引的优点是劳动力费用少,不需要较熟练的劳动力,电动滚轮能很快地放在电缆沟内牵引电缆。

电缆沟回填 全部电缆牵引就位后,在电缆沟内回填 150 mm 厚软土盖没电缆,其后对电缆外护套进行电压为 10 kV 时间为 1 min 的直流耐压试验,以检验外护套在电缆牵引过程中是否被损坏。试验合格后,在软土层上再覆盖一层厚约 50 mm 的钢筋混凝土板或具有醒目警告标志的识别板,防止日后挖掘时误伤电缆。在此保护板上可用杂土回填至地面。

(史传卿)

dianlan zhongduan

电缆终端 (cable termination; cable pot-head) 电力电缆线路连接其它电气设备的附件。按照使用场所、所用材料或连接的设备不同,电缆终端

可分为户内终端、户外终端、环氧电缆终端、热缩电缆终端、冷缩电缆终端、预制电缆终端、象鼻电缆终端及气体绝缘金属封闭电器电缆终端等。它是所有电力电缆线路不可缺少的重要组成部件。电缆终端装设时,要将电缆金属套剥开,使绝缘线芯的导体和过渡金具(如出线梗)连接至其它电气设备,然后还必须恢复绝缘和防止水分侵入绝缘的密封性能。因此,电缆终端的制作和安装一般均在电缆安装现场采用较多的终端部件,以手工工艺完成,这就需要按不同类型的电缆,使用地点不同的要求,设计类别众多的电缆终端。电缆终端是电缆线路的一个薄弱环节。电缆终端处发生的事故占电缆线路总事故的70%左右,其原因多数是密封不完善,特别是户外终端,常因内绝缘吸进水分,降低了绝缘强度。电缆终端一直处在不断改进中。

电缆终端位于电缆线路末端,在电力系统出现内、外过电压时,侵入波能在末端反射叠加,因此要求电缆终端的绝缘不低于电缆本体的绝缘水平。电缆终端绝缘按在密封套之内和外,分为内绝缘和外绝缘,内、外绝缘相互配合达到终端绝缘的要求。

(1) 内绝缘。电缆终端的密封套常以金属壳体、瓷或环氧套等组装而成,壳体内所用绝缘材料和电缆本体不同,几何形状各异,因此产生了轴向应力。为了缓和绝缘内的集中应力,10kV 及以上电压的电缆终端都装有电缆应力锥或应力管。

油纸绝缘电缆的内绝缘常以电缆油或绝缘胶作为主要绝缘并填充终端内气隙,在温度变化时,填充物膨胀或收缩,按终端设计不同,采取相应措施,防止终端破裂。

(2) 外绝缘。除封闭式电缆终端外,电缆终端的外绝缘均受到气候环境的影响。电缆终端外绝缘的设计主要是绝缘套表面的设计,不但要满足电气距离的要求,且需按环境污、湿特征和污秽等级以及海拔高度等因数适当加强绝缘。

参见彩图插页第 31 页 98 图。

参考书目

Bungay E M G, McAllister D. Electric Cables Handbook. BSP Professional Books, 1990

(李给莉)

dianli bianyaqi

**电力变压器** (power transformer) 借助于电磁感应作用,将一种交流电压和电流变成频率相同的另一种或几种不同的电压和电流,并用于电力系统输电、配电和用电的电气设备,简称变压器。它是一种静止的电器,由一个或几个绕组套于铁芯上做成。不同绕组间通过磁链的耦合,使电能得以在不同的电回

路中传递,以实现传输和分配电能的目的。参见彩图插页第 15 页 45 图。

**分类** 电力变压器可以按用途、相数、绕组数及其结构形式、铁芯与绕组的组合结构、调压方式、绝缘介质、冷却方式等的不同进行分类。①按用途不同可分为升压变压器、降压变压器、联络变压器、配电变压器以及用于直流输电的换流变压器等;②按相数不同可分为单相变压器、三相变压器和在特殊情况下使用的多相变压器;③按绕组数及其结构形式不同可分为双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器、自耦变压器和分裂变压器等;④按铁芯与绕组的组合结构不同可分为芯式变压器和壳式变压器;⑤按调压方式不同可分为有载调压变压器、无励磁调压变压器和无分接变压器;⑥按绝缘介质不同可分为油浸变压器(内注矿物油或聚氯联苯、硅油等合成油)和干式变压器(内充空气、六氟化硫气体或以树脂浇注等);⑦按冷却方式不同可分为油浸自冷(ONAN)变压器、油浸风冷(ONAF)变压器、强迫油循环风冷(OFAF)变压器、强迫油循环水冷(OFWF)变压器、强迫油导向循环风冷(ODAF)变压器、强迫油导向循环水冷(ODWF)变压器和蒸发冷却变压器。图 1 为强迫油循环风冷式

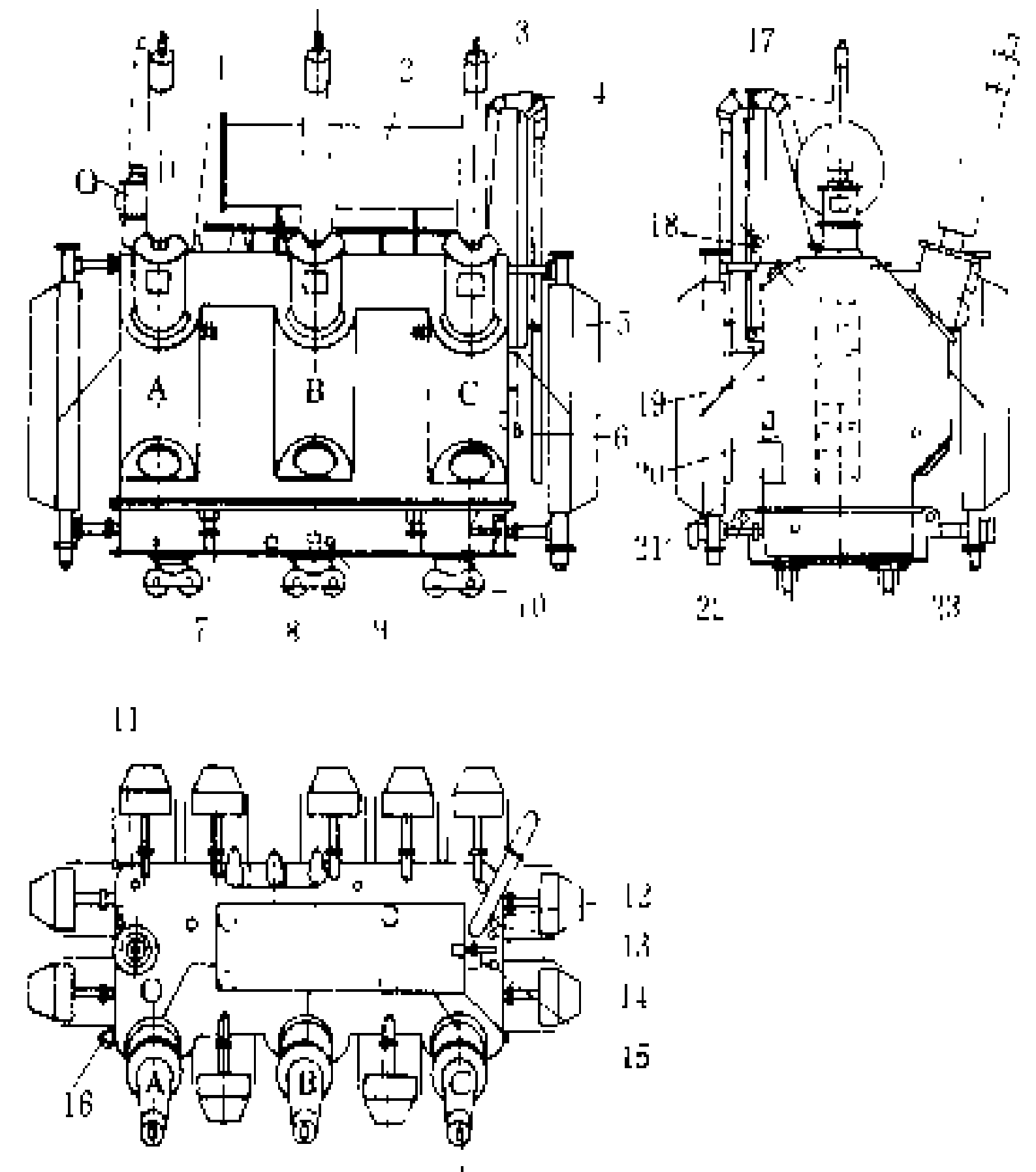
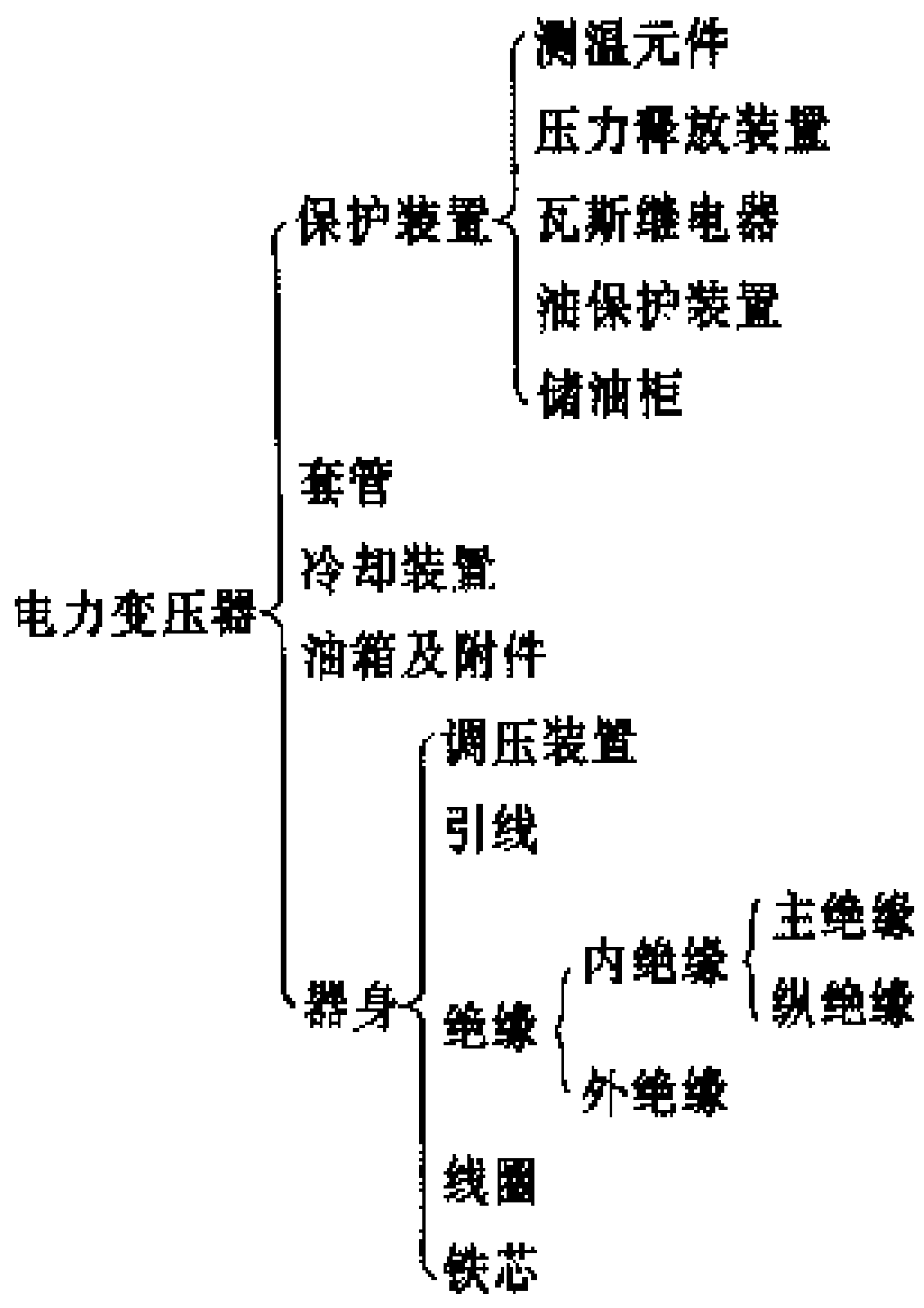


图 1 SFPL-120000/220 型电力变压器外形图  
1—接地套管;2—油枕;3—高压套管;4—压力释放装置;  
5—散热器;6—吸湿器;7—千斤顶支架;8—取油样阀门;  
9—接地螺钉;10—滚轮;11—分接开关操动机构;12—信  
号温度计;13—水银温度计;14—电阻温度计;15—瓦斯  
继电器;16—事故放油阀门;17—中性点套管;18—低压  
套管;19—梯子;20—油箱;21—接线箱;22—起吊孔;23—  
潜油泵



SFPL - 120000/220 型电力变压器外形图。

**结构** 构成电力变压器的基本元件是铁芯和线圈。另外，不同电压等级的变压器有不同的绝缘结构，不同冷却介质的变压器有不同的散热结构。下面是油浸式电力变压器的结构概况。参见彩图插页第 15 页 47 图。



**铁芯** 由芯柱、铁轭和夹件组成的变压器的主要磁路，也是变压器器身的机械骨架。铁芯结构型式分芯式和壳式两种。铁芯采用彼此绝缘的薄硅钢片叠积而成，也有用硅钢板卷制成的卷铁芯。

自 1935 年晶粒取向的冷轧硅钢带出现后，铁芯材料由原来的热轧硅钢板改进为冷轧硅钢板，钢板厚度也由 0.5 mm 减小到 0.35 mm，常用厚度仅为 0.3

mm、0.23 mm 等更薄的冷轧硅钢板。铁芯结构及加工工艺也有了不断改进，如叠片搭接由直接缝 [见图 2 (a)] 改为全斜接缝 [见图 2 (b)]，用玻璃粘带绑扎代替用

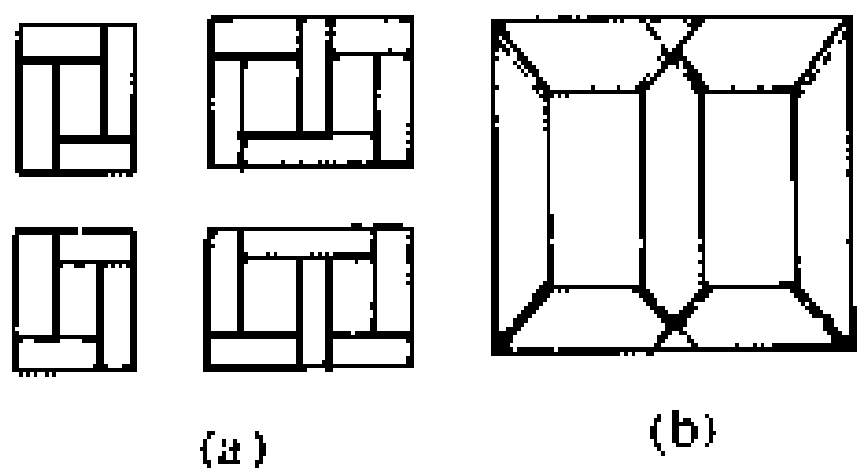


图 2 铁芯叠装示意图  
(a) 直接缝铁芯；  
(b) 全斜接缝铁芯

螺杆夹紧，为减少切口毛刺采用快速自动剪切机剪切。铁芯材料、结构及加工工艺的改进，都是为了降低变压器的铁芯损耗。参见彩图插页第 16 页 50 图。

电力变压器的铁芯多数为芯式结构。芯式变压器中通常采用单相二柱式和三相三柱式铁芯。大容量变压器由于受运输高度的限制，有的采用单相四柱（二柱旁轭式）铁芯、单相单柱旁轭式铁芯和三相五柱（三柱旁轭式）铁芯。壳式变压器制造工艺较复杂，但具有机械强度高、漏抗小和耐冲击性能好等优点，超高压大容量及特殊用途的变压器中均有采用。中国 500 kV 的电力系统中也有采用壳式变压器的。芯式和壳式变压器

的结构示意分别如图 3 及图 4 所示。

变压器的铁芯和夹件需要用绝缘纸板隔开，并分别通过油箱接地。对于大、中型电力变压器，为便于检查铁芯接地故障，通常将铁芯接地引线通过瓷套引至油箱外部再接地。

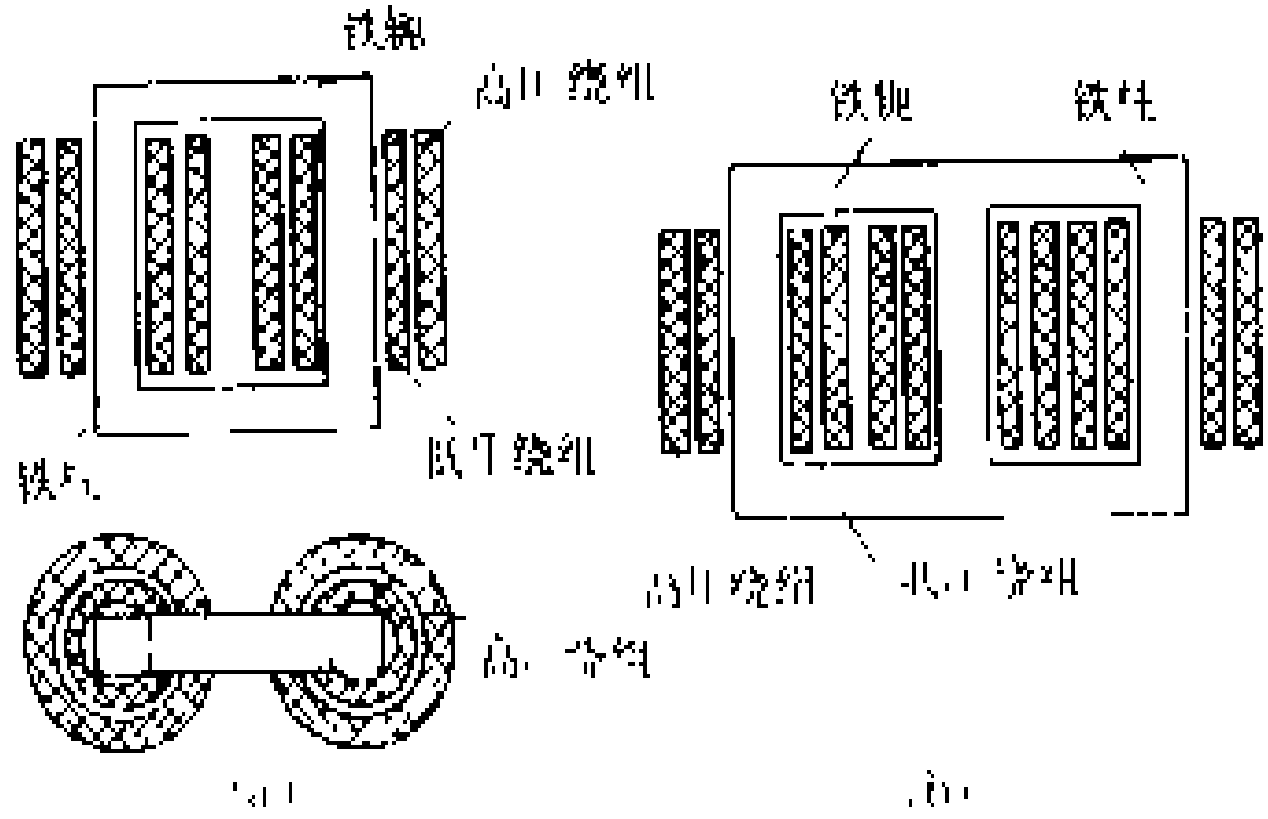


图 3 芯式变压器结构示意图  
(a) 单相；(b) 三相

**线圈** 用包有绝缘的铜或铝导线绕制成的一组串联的线匝，它是组成变压器绕组的单元。与变压器所标志的某一电压值相对应的电气线路所包括的线圈的组称为绕组。变压器的线圈有多种绕制方式和结构型式，下面是芯式变压器的线圈型式分类情况。

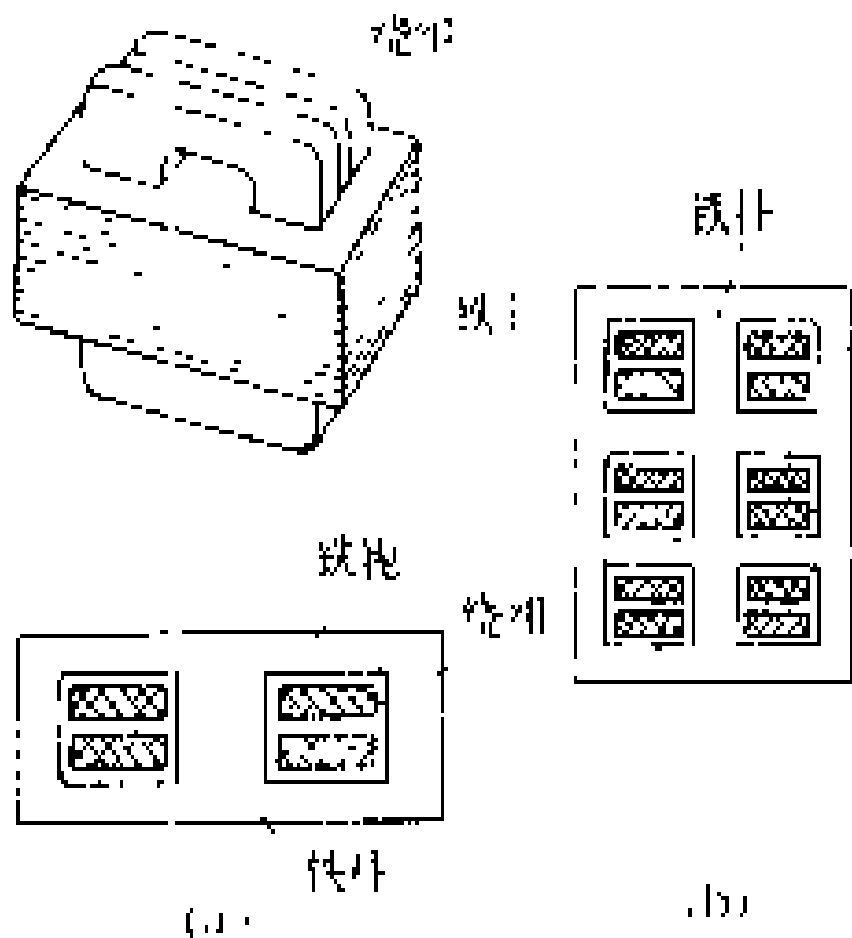
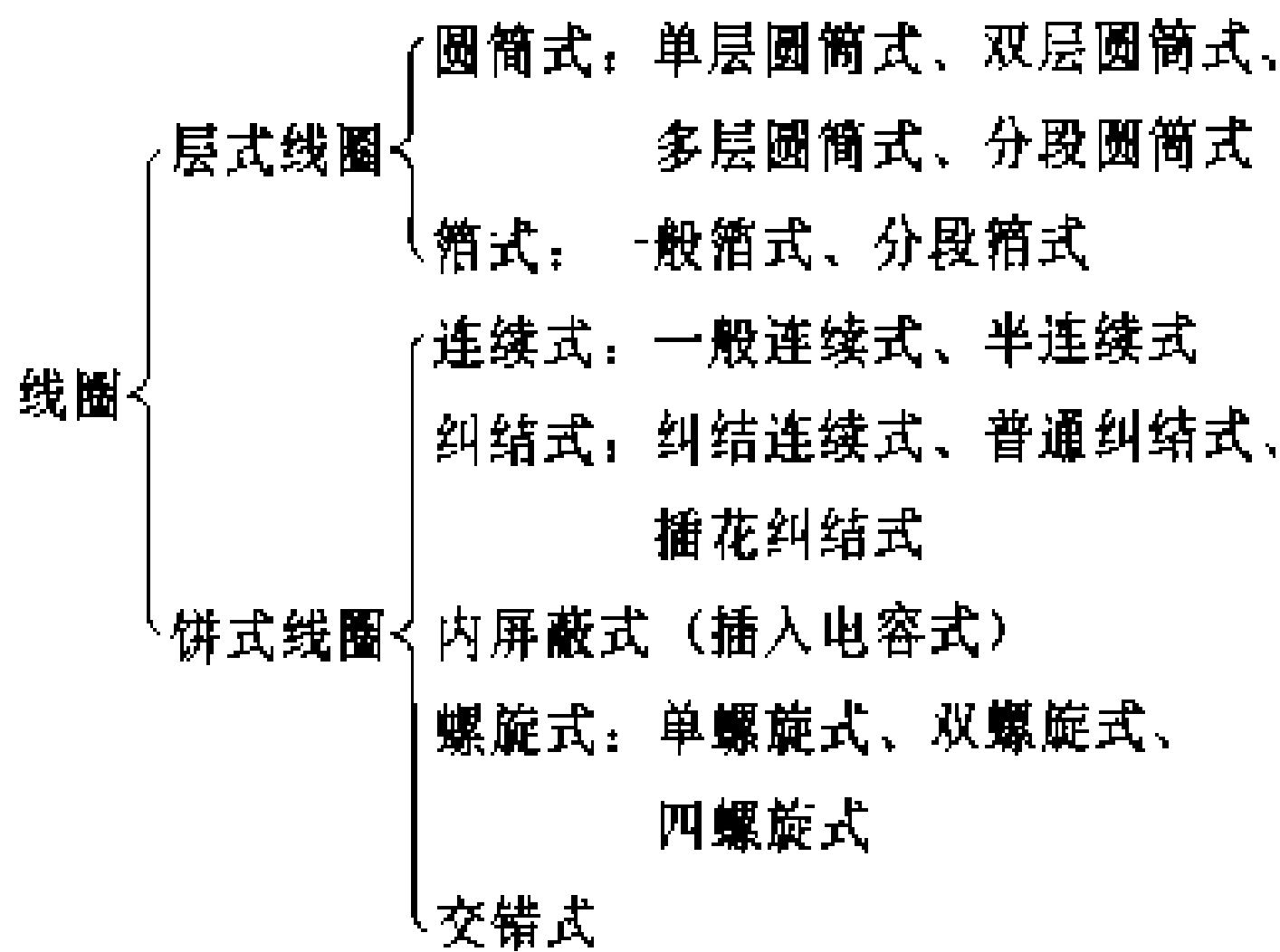


图 4 壳式变压器结构示意图  
(a) 单相；(b) 三相

式变压器的线圈型式分类情况。



圆筒式线圈是最简单的一种线圈型式，它由一根或几根并联的绝缘导线沿轴向螺旋形连续绕制而成。当匝数多时可绕成多层式，层间可设纵向油道。圆筒式线圈一般用于小型变压器，但由于其耐雷电冲击性能好，在超高压线圈中已有选用。

箔式线圈是用铜或铝金属箔按每层一匝（低压绕组）或分段为几匝（高压绕组）连续绕制而成的。它具



有较高的抗短路电流强度的能力，在配电变压器中逐步得到应用。

连续式线圈是由若干根扁线沿辐向绕制成的一组饼状线段组成的，每一线段有若干匝，每匝为一根或由几根扁线并联。连续式线圈结构机械强度高，散热性能好，可用于较大容量的电力变压器，但由于其耐雷电冲击性能较差，故不能满足较高电压的要求。

纠结式线圈是一种线匝之间交叉纠结连接的特殊连续式线圈，它的线段中相邻的两个线匝在电气上并不直接串联，而是间隔几个线匝再串联，以增大纵向电容，改善冲击波作用下线圈上的电位分布，从而提高变压器的耐雷电冲击能力。纠结式线圈绕制工艺较复杂，导线焊接点多，所以有时可采用部分纠结和部分连续的纠结连续式线圈。当并联导线的根数较多时，有时也将各根导线互相之间交叉排列，称之为插花纠结式线圈。

内屏蔽式线圈是在连续式绕制的部分线段的指定匝间插入不承担负载电流的绝缘导体的线圈。内屏蔽

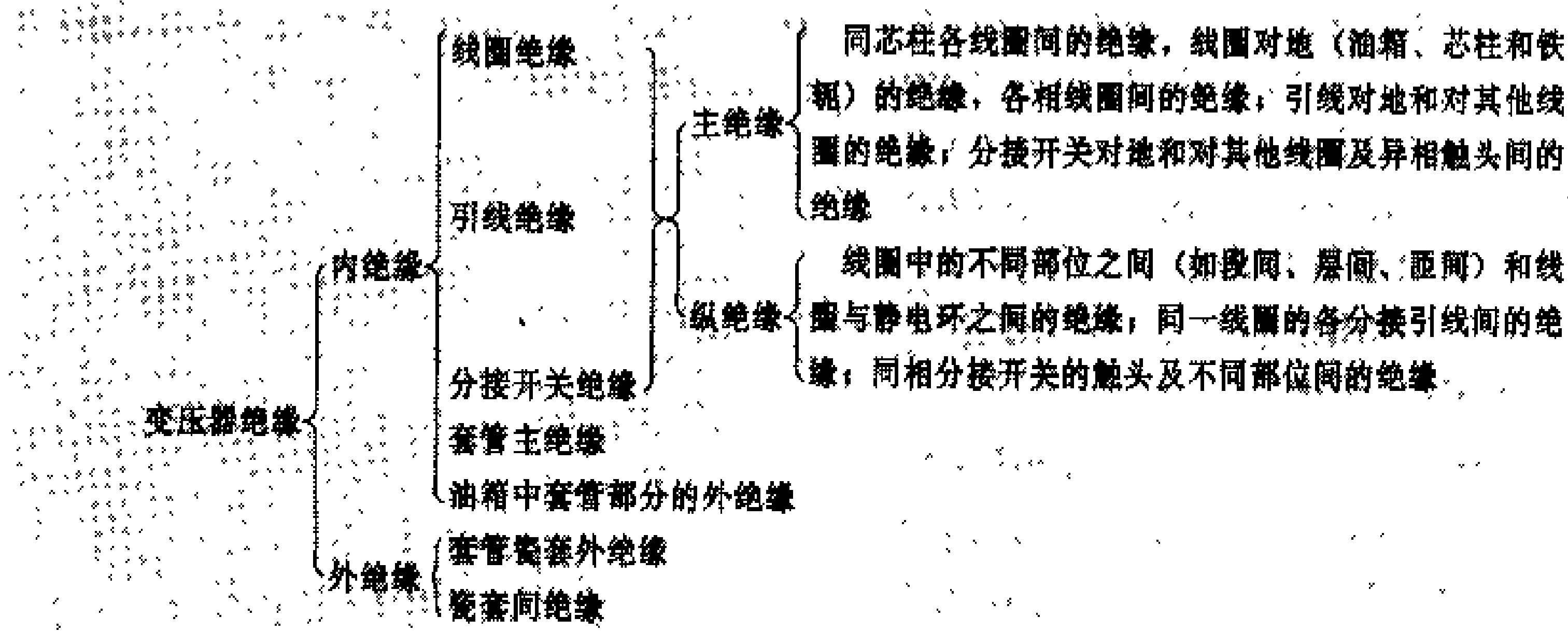
式线圈增加了线圈的纵向电容，改善了电位分布，是最适用于并联导线根数较多或采用换位导线而无法纠结绕制的大容量高电压线圈。

螺旋式线圈是由若干根扁线沿辐向排列再沿轴向间隔一个油道宽度绕成螺旋状的线圈。根据并联导线的根数不同，螺旋式线圈可分为单螺旋式、双螺旋式和四螺旋式三种，一般用于低压大电流线圈或调压线圈。

交错式线圈是一种由不同型式的线段交错排列而成的线圈。

还有一种壳式变压器常用的交叠式线圈，是沿铁芯柱的方向将高、低压线圈分成若干组混合交叠排列而成的线圈。

绝缘 变压器内导体之间和导体与地之间的介质结构。变压器的绝缘按能长期承受工频工作电压、可能遭受的工频过电压、雷电过电压和操作过电压进行设计。变压器的绝缘结构按其部位与功能可作如下分类：



油浸式变压器中主要的绝缘材料是变压器油和纤维绝缘纸，而在干式变压器中较多使用合成绝缘材料。油纸绝缘结构从小型配电变压器到超高压和特高压变压器，基本都能满足使用要求。绝缘纸和压制成的绝缘纸板通常用作匝间、层间绝缘和线圈中的垫块、撑条，主绝缘的隔板、角环、绝缘筒等，作为固体绝缘。在固体绝缘的间隙部位则由绝缘液体（变压器油）来填充。为了提高变压器的绝缘性能，除靠保持有足够的绝缘距离外，在电压等级较高的变压器内，还要采取线圈的不同绕制方法、线圈端部加装静电环、使用成型绝缘件等措施，使电场分布尽量均匀，还对铁芯实行屏蔽以提高工频电压下的起始放电电压。

调压装置 为适应系统电压幅值或相位在一定范围内变化的需要而进行变压器电压调整的装置（见变压器调压装置）。实现电压幅值的变化而不改变其相位的电压调整称为同相调节，是目前大多数变压器采用的调整方式。调节变压器输出电压相角的电压调整称

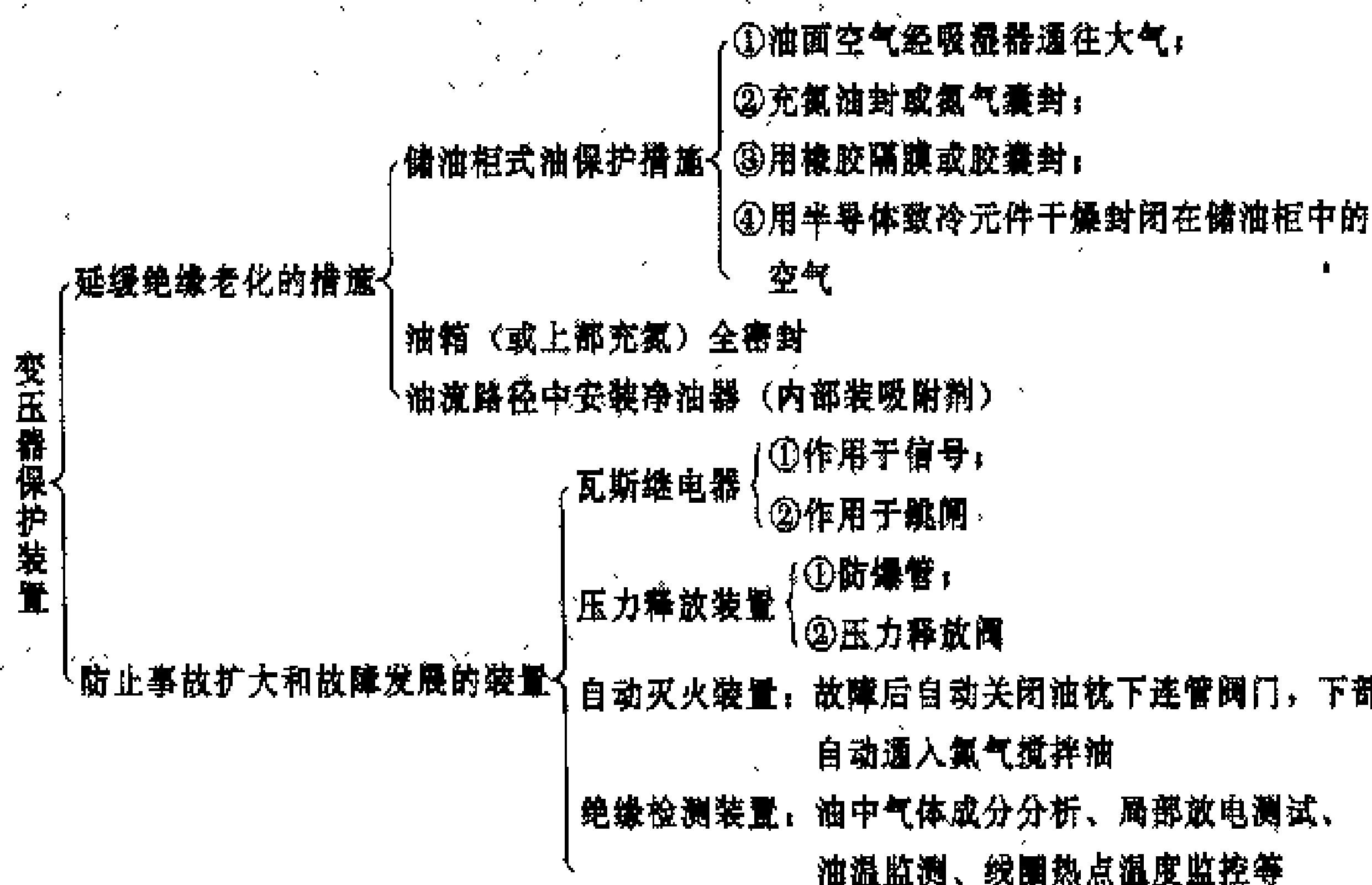
为相位调节，如输出端电压的相位按  $90^\circ$  方向调节幅值的称为横向调节，主要用于环网以强制分配环网电流，达到降低线损的目的。同相调节是利用改变同一铁芯柱的线圈匝数来实现的，相位调节是利用不同芯柱上的调压线圈相串联或接线组别的变化来实现。

油箱 油浸式变压器的外壳。根据不同的散热条件，有平面油箱、管式油箱和波纹式油箱等。为满足现场检修或维护的需要，有钟罩式油箱和上顶盖法兰密封式油箱等。为满足运输要求，有箱外带挂钩的、适合悬吊运输的斜式油箱和分成几部分的分裂式油箱和一般油箱等。为满足油箱机械强度要求，大型变压器的油箱通常焊有加强筋和相应的加固结构。

冷却装置 见变压器冷却。

套管 见套管。

保护装置 除系统中设置的有关变压器的继电保护装置外（见变压器保护），属于变压器自身的保护装置如下：



**工作原理** 以最基本的双绕组变压器为例，其工作原理图如图 5 所示。当交流电压加于一次绕组两端时，在铁芯中产生与电源频率相同的交变磁通交链着两个绕组，磁通在两个绕组的每一匝线圈中所产生的感应电动势相等。根据电磁感应定律，绕组两端产生的感应电动势 ( $e$ ) 与其包围的磁通的变化率 ( $d\phi/dt$ ) 及绕组的匝数 ( $n$ ) 成正比，即  $e = -n d\phi/dt$ 。当电源为正弦波时，一次绕组感应电动势的有效值  $E_1 = 4.44 f n_1 \Phi_m$ ，其中  $f$  为电源频率， $\Phi_m$  为主磁通幅值，二次绕组感应电动势的有效值为  $E_2 = 4.44 f n_2 \Phi_m$ 。

空载时，一次绕组的空载电流  $I_0$  产生的磁通，除交链两个绕组的主磁通  $\Phi_m$  外，还有一小部分是仅交链本身绕组的漏磁通  $\Phi_{l1}$ ，如图 5 (a) 所示。漏磁通通过外部空间相闭合，不受铁芯的磁滞、磁饱和等非线性因素影响，在电路中仅起产生漏抗压降的作用。由于漏抗压降很小，当只从数量关系分析时，可以认为一次绕组端电压的有效值  $U_1 = E_1$ ，此时二次绕组开路电压的有效值  $U_{20} = E_2$ 。变压器的变比  $K = E_1/E_2 \approx U_1/U_{20}$ 。若  $n_1 > n_2$ ，则  $U_1 > U_2$ ，为降压变压器；若  $n_1 < n_2$ ，则  $U_1 < U_2$ ，为升压变压器。

当二次绕组接通负荷后，二次绕组中有电流  $I_2$  流过，如图 5 (b) 所示。一次电流必定随之增加以抵消二次电流感应产生的磁通势，保持铁芯中主磁通  $\Phi_m$  不变。因此，一次电流与二次电流所产生的合成总磁通势在铁芯中所产生的工作磁通几乎与负荷无关，带负荷时的励磁电流可认为与空载电流近似相等。在忽略负载时的励磁电流 (因此值很小) 的情况下，由磁通势平衡方程式可推导出： $I_1/I_2 \approx n_2/n_1 = 1/K$ ，即通过一、二次绕组的电流值与其匝数成反比。变压器带负荷时，一次绕组流过的电流有两个分量，即励磁电流分

量和负荷电流分量，二次绕组输出的能量完全是经过一次绕组传递的。

变压器在传递能量的过程中，空载电流和负载电流会引起损耗。二次输出功率  $P_2$  与一次输入功率  $P_1$  之比称为变压器的效率，即  $\eta = P_2/P_1$ 。

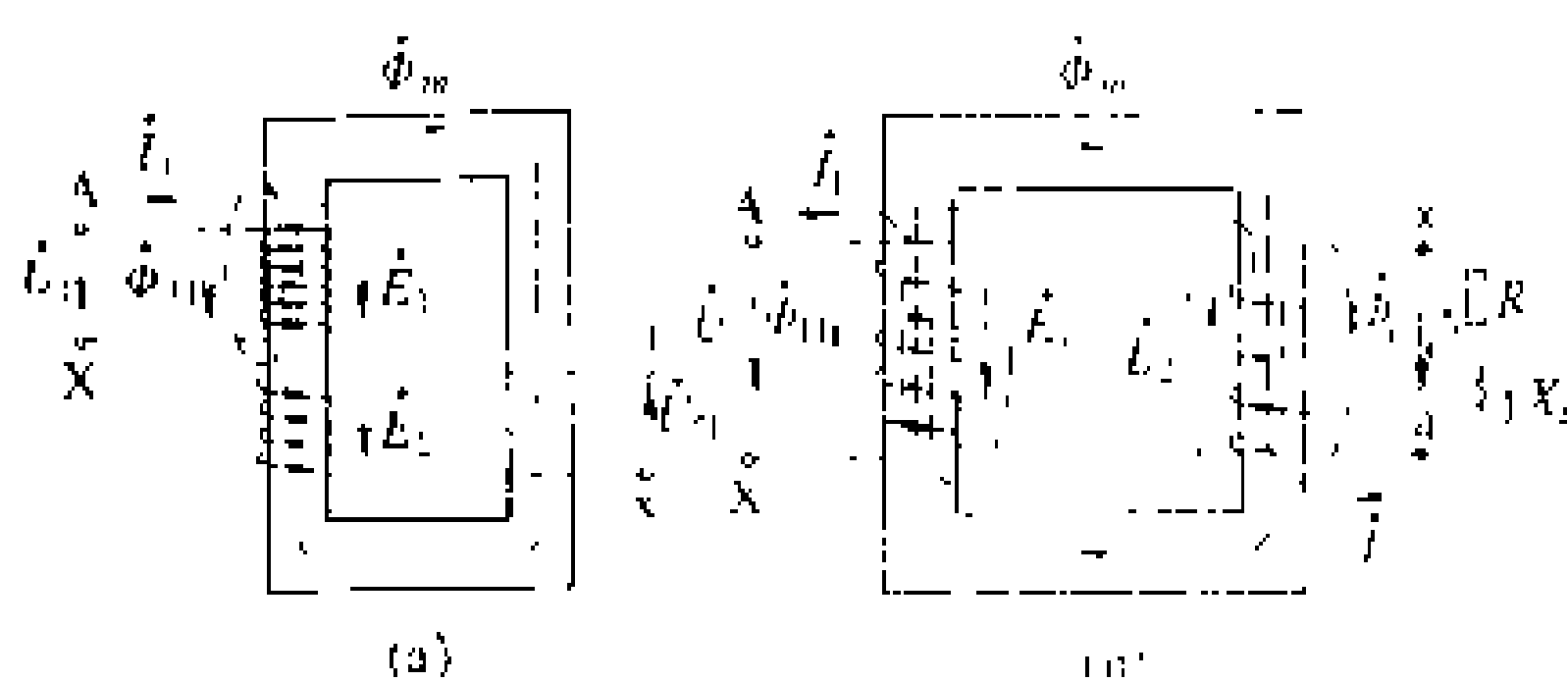


图 5 变压器工作原理图  
(a) 空载；(b) 负载

**用途** 利用升压变压器把发电机的端电压升高到输电电压，使相同的输送容量下电流可减小，降低线路损耗和线路压降。当电能输送到用电地区后，需要用降压变压器把电压降至配电电压，然后由配电变压器把电压降低到用电电压。几个不同电压等级的输、配电系统需要彼此连接时，可用联络变压器来实现。

**额定参数** 电力变压器的额定参数主要有额定电压、额定电流、额定容量和额定频率。此外，还有绕组的接线组别、电压调整方式和范围、阻抗电压、空载电流、空载损耗、绝缘水平、正常使用条件和非正常使用条件等。

额定电压是单相变压器的绕组端子间或三相变压器与线路连接的端子间由铭牌所规定的电压值。额定电流是绕组的额定容量除以该绕组的额定电压及相应的相系数 (单相为 1，三相为  $\sqrt{3}$ ) 所得的电流值。额定容量是视在功率的惯用值。长期连续运行条件下

保证的额定容量值为额定电压、额定电流和相应相系数的乘积。变压器额定容量有的是指输入视在功率,也有的是指输出视在功率,各国标准对此规定不一。

**历史及前景** 1831年法拉第从实验中发现电磁感应现象,为变压器的发明打下了基础。世界上第一台为申请专利用拉丁语命名的变压器,于1884年9月在匈牙利的岗茨工厂诞生,该第一台闭路铁芯变压器的频率为40 Hz,容量1400 V·A,一、二次侧电压为120/72 V。1890年德国、瑞典几乎同时生产了三相电力变压器。1975年联邦德国生产出的电压为1150 kV、容量为1800 MV·A的单相大型电力变压器,是迄今世界上最大的电力变压器。

为提高变压器的可靠性、经济性以及解决大型变压器的运输困难问题,近年来主要是加强了对变压器原材料和结构的研究。如为了降低铁磁损耗,变压器铁芯采用高磁感应冷轧取向硅钢片,发展了经激光处理的高导磁硅钢片和非晶合金材料。为了降低涡流损耗,在线圈绕制中增加换位导线,在绝缘材料方面,使用不同拉伸率的皱纹纸以提高绝缘紧密度,利用菱形点胶纸以增强纸的机械强度。为了提高温升限值和延缓绝缘老化,在造纸过程中加入定量的防止热裂解的稳定剂,制成耐高温纸。此外,对大型变压器的器身干燥处理,也正在逐步推广煤油气相干燥等新的工艺方法。

(凌 悠)

dianli dianlan

**电力电缆** (power cable) 外包绝缘的绞导线,有的还包有金属外皮并加以接地,也有不包金属外皮的某些橡塑电缆。主要用在地下或水下的输、配电线路中。按电压等级和绝缘材料的不同,电力电缆可分为油浸纸绝缘电缆、固体挤压聚合电缆和压力电缆三大类。

**油浸纸绝缘电缆** 用纸带绕包在导线上经过真空干燥后,浸渍矿物油作为绝缘层,在其上再挤包金属套的电力电缆。20世纪50年代前,用作电压等级在35 kV及以下的电力电缆线路。油浸纸绝缘的电性能非常稳定,有的油浸纸绝缘电缆运行了70多年,仍在使使用。即使在60年代后电力电缆绝缘材料不断更新的时期,油浸纸绝缘电缆仍占有广泛的使用领域。半个世纪来,油浸纸绝缘电缆经过不断改进和发展,可分成粘性浸渍纸绝缘电缆和滴流电缆两种,而按不同的结构,这两种电缆又都可分为带绝缘电缆、屏蔽型电缆和分铅型电缆。

**固体挤压聚合电缆** 由于石油工业的发展,开发了较多电性能良好的聚合材料,用它挤压在导线上作

为电缆的绝缘。这种电缆不存在油浸纸绝缘电缆的淌油等缺点,而且制造工艺简单,近年来已有取代油浸纸绝缘电缆的趋势。按聚合材料的不同,固体挤压聚合电缆又可分成聚氯乙烯电缆、聚乙烯电缆、交联聚乙烯电缆和乙丙橡胶电缆。

**压力电缆** 主要用于63 kV及以上电压等级的电缆线路。油浸纸绝缘电缆的纸层间,经过运行,总是存在气隙,这种气隙在电场强度较高时,会出现游离放电,最终导致绝缘层击穿。为了抑制气隙,用带压力的油或气填充或压缩气隙,是压力电缆的结构特点。按填充或压缩气隙的措施不同,压力电缆可分成自容式充油电缆、充气电缆、钢管充油电缆、钢管压气电缆和压气(SF<sub>6</sub>)绝缘电缆。

**发展过程及趋势** 最原始的电力电缆是用黄麻绕包在铜棒上再用石蜡浸渍后放在铸铁管中,其后不断改进,其主要发展过程为:1914年M. 霍赫施泰德(M. Höchstadter)创造了屏蔽型电缆;1914年邓希思(Dunsheath)发展了分铅型电缆;1917年L. 埃曼努埃利(L. Emanueli)发明了充油电缆;1931年贝内特(Bennett)首创了钢管充油电缆;1933年C. J. 比弗(C. J. Beaver)试验成功了132kV充气电缆;1944年英国敷设了第一根3kV聚乙烯电缆。

固体挤压聚合电缆由于没有淌油等缺点,已经有取代油浸纸绝缘电缆的趋势,同时固体挤压聚合电缆也无需如压力电缆那样需要用油或气填充或压缩纸层间气隙,因此固体挤压聚合电缆经过不断改进,也有替代压力电缆的趋势。

参考书目

飯塚喜八郎・電気ケーブル技術ハンドブック・東京:株式会社電気書院,1989

(陆德铭)

dianli dianlan xianlu

**电力电缆线路** (power cable line) 采用电缆输送电力的输电和配电线路。一般敷设在地下或水下,也有架空敷设的配电网线路。电力电缆线路主要由电缆本体、电缆接头、电缆终端等组成,有些电力电缆线路还带有配件,如压力箱、护层保护器、交叉互联箱、压力和温度示警装置等。有些电力电缆线路也包括相应的土建设施,如电缆沟、排管、竖井、隧道等。

电力电缆线路的主要优点是:①不受自然气象条件(如雷电、风雨、盐雾污秽等)的干扰;②不受沿线树木生长的骚扰;③有利于城市环境美化;④不占地而走廊,同一地下通道可容纳多回线路;⑤有利于防止触电和安全用电;⑥维护费用小。缺点是:①同样的导线截面积,输送电流比架空线的小;②投资建设费用比率

成倍增大,并随电压增高而增大;③事故修复时间长。

早在1880年,爱迪生(Edison)在纽约和费兰蒂(Ferranti)在伦敦几乎同时用绝缘导线埋在地下,作照明供电使用,成为最早的电力电缆线路。1932年在意大利的米兰市安装了第一根220 kV充油电缆,1969年在法国安装了第一根225 kV聚乙烯电缆,同年在美国纽约还试装了第一根345 kV SF<sub>6</sub> 电缆,1974年在美国大古力(Grand Coulee)建成了525 kV充油电力电缆线路。

随着电缆线路绝缘结构的发展,电缆线路的敷设方式也不断发展。1916年在美国旧金山成功地敷设了长6 km的12 kV 3芯海底电缆,1922年在日本东京采用了排管敷设的电缆线路,1938年在美国农村中采用了架空电缆,1962年在英国爱亭顿(Addington)与裴亭顿(Beddington)之间装设了间接冷却电缆线路。

由于城市工商业的发展,负荷密度增加,用架空线作为城市中的输、配电线路,已经无法适应城市发展及美化城市的需要,因此电力电缆线路得到不断发展并成为建设现代城市的一个重要环节。电力电缆线路多建在城市,中国规定城市电力网的输电线路与高、中压配电线路在下列情况下应采用电缆线路:①依据城市规划,繁华地区、重要地段、主要道路、高层建筑区及对市容环境有特殊要求者;②架空线路和线路导线通过严重腐蚀地段在技术上难以解决者;③供电可靠性要求较高或重要负荷用户;④重点风景旅游区;⑤沿海地区易受热带风暴侵袭的主要城市的重要供电区域;⑥电网结构或运行安全的需要。城市电力网低压配电线路在下列情况下应采用电缆线路:①负荷密度高的市中心区;②建筑面积较大的新建居民住宅小区及高层建筑小区;③依据规划不宜通过架空线的街道或地区;④其他情况经技术经济综合比较采用电缆线路更为合适者。对于应采用电缆线路而地下不具备敷设条件时,可采用绝缘电缆架空敷设方式。

#### 参考书目

飯澤喜八郎,電力ケーブル技術ハンドブック,東京:株式会社電気書院,1989

(陆德绥)

dianliu huganai

**电流互感器** (current transformer) 电力系统中将一次侧交流大电流转换成可供测量、保护或控制等仪器、仪表或继电保护装置使用的二次侧小电流的变流设备。电流互感器的一次绕组通常与需测量、保护或控制的电路串联,二次绕组则与测量、保护或控制装置的电流线圈连接,使一、二次侧高、低压电路互相隔离。正常使用时,电流互感器的变比约等于一、二

次额定电流之比,即一、二次绕组匝数的反比。两侧电流间的相位差接近于零。

**类型** 按照结构和用途的不同来划分,常用的电流互感器有穿墙式电流互感器、母线式电流互感器、树脂浇注式电流互感器、电缆式电流互感器、套管式电流互感器和油浸式电流互感器等。

**穿墙式电流互感器** 主绝缘为穿墙瓷套,一次绕组为贯穿于瓷套中的一根紫铜棒,并同瓷套一起贯穿于铁芯之中的电流互感器。铁芯上绕有两个二次绕组,分别用于测量和保护。瓷套外表面未上釉的部分涂有石墨半导体漆,并使其接地,以消除接地金属部件与瓷件间空气隙的电游离现象。一次绕组有单匝和多匝两种,按负荷大小选用。穿墙式电流互感器已广泛用于10 kV及以下的屋内配电装置。其优点是绝缘性能可靠,使用方便。

**母线式电流互感器** 主绝缘为瓷套,一次绕组为贯穿于瓷套中的母线,瓷套贯穿在铁芯之中的电流互感器。铁芯上绕有供测量和保护用的两个二次绕组。瓷套用水泥浇装在铁制端盖上,其两端有瓷套帽和夹板,供夹紧母线用。母线式电流互感器广泛应用于10 kV及以下的屋内配电装置。

**树脂浇注式电流互感器** 用浇注的环氧树脂作为主绝缘的电流互感器。其一次绕组和二次绕组由环氧树脂浇注成一个整体,铁芯分为上下两部分,以改善其误差性能。有供测量和保护用两个二次绕组。树脂浇注式电流互感器用于10 kV及以下的屋内配电装置,其优点是体积小、重量轻、绝缘性能好。

**电缆式电流互感器** 本体为一环状铁芯,直接套在电力电缆外皮上的电流互感器。其铁芯上绕有二次绕组。当中性点不接地系统发生接地故障时,电缆的金属外皮有接地电流通过,在电缆式电流互感器的二次绕组中产生电流而使接地保护动作。

**套管式电流互感器** 装在断路器或电力变压器等引出线套管的密封座内的电流互感器。套管的导电芯棒即是一次绕组。环状铁芯用带状硅钢片卷制而成,二次绕组用绝缘线绕在铁芯上,外包斜纹布,整个互感器用绝缘漆浸渍。其二次绕组通常备有不同变比的抽头,供测量和保护装置选用。

**油浸式电流互感器** 有“8”字形和电容型结构。其中二次绕组置于下部油箱的称为箱式,二次绕组置于瓷套上部的称为倒置式。“8”字形结构系将一次绕组和绕有二次绕组的环状铁芯连成“8”字形,一、二次绕组分开绝缘,并与铁芯一起浸入装有绝缘油的瓷箱内。油箱上部装有油膨胀器,油箱顶部铸铁帽内装有油保护隔膜,使油与空气隔离。一次绕组通常分为两组,引出线端处有变换变流比用的串、并联换接片。二次绕组

有 3~4 组,供测量和保护装置选用。

**工作原理** 电流互感器是按电磁感应原理工作的,它与电力变压器的主要区别是正常工作条件下二次回路阻抗很小,近乎短路状态。其一次电流取决于线路负荷,与互感器二次负荷无关。电流互感器受励磁电流的影响产生电流误差( $\Delta I$ )和相位差( $\delta$ )。 $\Delta I(\%) = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} \times 100(\%)$ ,式中  $K_n$  为额定电流变比, $I_1$  和

$I_2$  为一次和二次电流实测值。相位差  $\delta$  是实际的一次电流相量与转过  $180^\circ$  的二次电流相量间的夹角。实际上,电流误差主要决定于励磁电流所产生的铁损(有功分量),相位差则决定于励磁电流的磁化分量(无功分量)。对保护用电流互感器,要按额定准确限值一次电流(即满足复合误差  $\epsilon_c$  要求的最大一次电流)设计,其铁芯中的磁通密度要比测量用电流互感器的高得多。复合误差包括由励磁电流和二次电流中高次谐波分量影响所产生的误差, $\epsilon_c(\%) = \frac{100}{I_1}$

$\times \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_2 - i_1)^2 dt}$ ,式中  $I_1$  为一次电流有效值, $i_1$ 、 $i_2$  为一次、二次电流瞬时值, $T$  为工频周期。

**参数及特性** 电流互感器的参数及特性主要有额定值、准确级、保护用电流互感器的 10% 倍数等。

**额定值** 额定一次电流和额定二次电流值是电流互感器的基准值。一次电流可在 5~25000A 或更高范围内选择;二次电流通常为 5A 或 1A。额定容量可为 5~100V·A 间的不同值。电流互感器允许长期运行的最高电压为系统最高电压。

**准确级** 测量用电流互感器与保护用电流互感器有不同的电流误差及相位差的准确级要求。测量用电流互感器有 0.1、0.2、0.3、1 级等,保护用电流互感器有 5P、10P 级,供瞬态特性保护用的电流互感器有 TPX、TPY、TPZ 级。TPX 级为无气隙环形铁芯,在磁化特性规定的限值范围内,二次侧能准确成比例地反映一次故障电流中的交流分量和直流分量,无剩磁限值;TPY 级特性与 TPX 级相似,铁芯带有小气隙,静态剩磁不超过饱和值的 10%,适用于超高压电力系统的继电保护;TPZ 级的二次侧不出现故障电流中的直流分量,铁芯带有较大的气隙,剩磁可忽略不计。

**保护用电流互感器的 10% 倍数** 当一次电流成倍增加而电流误差达到 -10% 时的一次电流增加倍数。这个倍数越大,电流互感器的过电流性能越好。

**运行使用要求** 主要有:①按测量和保护的不同用途,选用不同类型与性能要求的电流互感器。②电流互感器正常工作时接近短路状态,其二次回路不得开路,避免产生过电压而造成事故。电流互感器的二次侧

必须有一点接地,且接线极性要正确。③对装设有高速动作继电保护的电力系统,要选择瞬态特性满足要求的电流互感器。

**现状与发展** 自超高压电力系统高速继电保护发展后,对电流互感器提出了暂态特性的要求。目前世界上已能生产适用于 750~1150kV 电力系统的电流互感器,正在发展 SF<sub>6</sub> 气体绝缘结构和高低压回路采用光耦合的电流互感器。

参见彩图插页第 20 页 61 图。

(蒲文宗)

dianqi celiang yibiao

**电气测量仪表** (electrical measuring instruments)

用于测量、记录和计量各种电学量的表计和仪器。电气测量仪表按被测电流的种类分为交流仪表和直流仪表两大系列;按结构特征分为指示仪表、电子和数字仪表、记录仪表、积算仪表和比较仪表,此类仪表可为安装式固定在屏、柜、箱上,也可为便携式;按测量功能分,常用的有电流表、电压表、欧姆表、功率表、功率因数表、频率表、相位表、同步指示表、电能表和多种用途的万用表等。此外,还有试验用的仪表和仪器,如电桥、兆欧表、接地电阻测量仪、谐波分析仪、谐波流向仪、示波器等。

**指示仪表** 将被测的模拟量转换为仪表可动部分的机械偏移角,并由指示器直接显示出被测量大小的仪表。此类模拟式指示仪表的测量机械多为电机机械式,故也称电机机械式指示仪表。

指示仪表的测量机构由指示装置、阻尼装置、反抗力矩装置和支承装置四个主要部分组成。电机机械式测量机构的基本原理是利用电流与磁场的相互作用产生力矩,使其可动部分带动指针或光标偏转。为判断此力矩的大小,设置了与偏转角成正比的反抗力矩装置,此两力矩平衡时,在标度盘上即可由指针或光标指示出所测电学量的大小。在其可动部分偏转运动时还产生磁感应阻尼力矩,限制可动部分摆动而使其尽快地稳定在平衡位置上。

电机机械式测量机构可分为磁电系、电动系和电磁系三种。

**磁电系测量机构** 磁场由永久磁铁提供,通以直流电流的可动线圈处于此磁场中时,受力而带动指针偏转。磁电系测量机构主要用于组成直流电流表、直流电压表、欧姆表等。此外,在磁电系测量机构上加上整流元件或变换元件后,可构成整流式测量仪表或变换器式测量仪表。

**电动系测量机构** 利用电流通过固定线圈产生磁场以代替永久磁铁,处于此磁场中的可动线圈通以电



流时,将受力而带动指针偏转。为增强工作磁场以获得较大的转矩,通常将固定线圈绕在铁芯上,称为铁磁电动系机构。电动系测量机构为交、直流两用,但主要用于组成交流有功功率表和无功功率表。

**电磁系测量机构** 一种是在圆形固定线圈内侧安放一固定铁片和一可动铁片,利用线圈通电产生磁场使两个铁片同时磁化,两者之间产生排斥力作用使动片带动指针偏转。另一种是由扁形固定线圈和一可动铁片组成,线圈通电产生磁场而将可动铁片吸入带动指针偏转。通常多利用排斥作用的测量机构。电磁系测量机构为交、直流两用,但主要用于组成交流电流表和交流电压表。

**电子和数字仪表** 利用电子技术实现测量的表计和仪器。

**电子仪表** 分为测量基本电学量的电子仪表(如测量电流、电压、功率),测量电路参数的电子仪表(如测量电阻、电容、电感、品质因数),测量电信号特性的电子仪表(如测量波形、频率、相位等)和其他专用的电子仪表。常用的有电子管电压表、电子示波器等。电子仪表的优点是精确度高,量程大,灵敏度高,速度快和易于实现自动化。

**数字仪表** 利用电子电路将被测的各种模拟量通过模拟转换和逻辑控制,能自动地以数字形式直接显示出来的仪表。数字仪表加上选测控制系统可构成巡回检测装置。常用的数字仪表有数字电压表、频率表、相位表和功率表等。数字仪表的优点是读数方便,没有视差,准确度高,测量速度快,输入阻抗高,功率消耗小,灵敏度高,抗干扰能力强,便于远距离输送。缺点是由于采用了大量的电子元件,结构比较复杂,成本较高,可靠性也较低。

**记录仪表** 用来记录电学量或经过变换将非电学量变换为电学量的仪表。记录仪表分直接驱动式和自动平衡式两种,按照记录方式不同又分为笔录式和打点式。直接驱动式是由输入信号直接驱动记录部分。自动平衡式是将输入信号与可变基准值相比较,当偏差值为零时达到平衡,能指示并记录出平衡时的基准值。记录部分由笔录或打点式记录机构、记录纸的走纸机构等组成。笔录式是连续记录,打点式是间断地依顺序转换多路输入测量点进行测量并记录,利用颜色、字形和符号等来识别测量点。

**积算仪表** 计量交流功率对时间积算值的仪表。通常称电能表。感应型电能表的测量机构是由驱动元件、转动元件、阻尼元件和积算机构组成。驱动元件由绕在铁芯上的电流线圈构成的电流元件和绕在铁芯上的电压线圈构成的电压元件所组成;转动元件由设在电流元件和电压元件两个铁芯空气间隙中的铝制圆盘

及固定铝盘的转轴构成;阻尼元件为永久磁铁,在铝盘转动时产生磁感应阻尼力矩;积算机构由与转轴装成一体的蜗杆、蜗轮、齿轮和滚轮等构成,滚轮上有数字用以积算。在通电时电流和电压元件产生的交变磁场在铝盘上分别产生涡流,利用涡流与交变磁通的相互作用产生转矩,驱使铝盘转动并带动积算机构。

**比较仪表** 利用测量电路内的标准电阻、标准电感或标准电容与被测量进行比较和平衡来确定被测电学量大小的仪表。比较仪表有直流比较仪表和交流比较仪表,如直流单臂和双臂电桥,交流电桥等,用以精密测量直流电阻、电容、介质损耗、自感、互感等电学量。

**发展趋势** 自20世纪20年代大量采用模拟式指示仪表以来,在结构、材料、外形等方面作了不少改进,以提高仪表的性能,但其基本原理则仍然依旧。50年代电子仪表开始使用,而数字仪表的同时问世为电子仪表开辟了一个新的领域,它不仅在原理上而且在结构上完全不同于模拟式仪表。70年代应用大规模集成电路制成了固态式、微处理机式电子数字仪表。电气测量仪表总的趋势是向固态化、数字化、自动化和多用化方面发展,与电子技术的迅速发展有着紧密的联系。但在相当一个时期内,模拟式仪表不会被数字式仪表完全取代,主要是由于模拟式仪表能连续显示被测量的变化,这是数字式仪表做不到的。

(唐统一)

dianqi shebei jueyuan shuiping

**电气设备绝缘水平** (insulation level of electrical equipment)

电气设备绝缘耐受电压的能力。在长期运行条件下,电气设备应能耐受工作电压、内部过电压和雷电过电压的长时间作用或多次作用而不损坏,为此,事先应将电气设备经受一定的耐压试验。耐压试验的电压类型包括雷电冲击耐受电压、操作冲击耐受电压和工频耐受电压。与雷电冲击耐受电压相对应的有全波冲击绝缘水平和截波冲击绝缘水平。与操作冲击耐受电压相对应的有操作冲击绝缘水平。绝缘水平的确定与保护设备的性能和接线方式、绝缘配合的原则以及设备使用条件等因素有关。在所有变电所内均装设有避雷器限制雷电过电压,故设备的雷电冲击耐受电压根据避雷器的残压决定,称为电气设备的全波冲击绝缘水平,也称基本冲击绝缘水平(用BIL表示)。电气设备的操作冲击绝缘水平(用SIL表示)由既定的内部过电压计算倍数决定。330 kV及以上的超高压长线路,用专门措施将操作过电压限制到一定的水平。220 kV及以下的变电所,一般不采用限制操作过电压的专门措施,电气设备的操作冲击耐受

电压用工频耐受电压代替。

随着电力系统额定电压的提高，限制过电压措施的不完善，长时间工作电压逐渐成为决定电气设备绝缘水平的主要因素。

在严重污秽地区，设备的外绝缘强度大大降低，污闪、雾闪、冰闪等事故常有发生，在此情况下，设备外绝缘水平将很大程度上决定于系统的最大运行电压。

对于不同电压等级的电力系统，国际电工委员会(IEC)推荐了耐受电压的一系列标准数据，其中对运行电压在100 kV以上的设备，同一电压等级又分若干级的耐受电压，以便选用。中国国家标准 GB311·1《高压输变电设备的绝缘配合》中第3·1条规定了3~220 kV设备的绝缘水平，第3·2条中则规定了330~500 kV设备的基准绝缘水平，指明设备的额定操作和雷电冲击耐受电压应在750, 850, 950, 1050, 1175, 1300, 1425, 1550, 1675, 1800, 1950, 2100, 2250, 2400, 2550, 2700 kV中选取，不宜使用两个数据间的中间值。

合理选择电气设备绝缘水平，是综合性很强的技术经济问题，需要全面衡量设备造价、维护费用及事故损失等三方面的得失，力求达到安全、经济和可靠供电的目的。

(方 瑜)

dianqi shebei kangzhen

**电气设备抗震** (seismic stability of electric equipment) 包括电气设备的震害、震害原因分析、耐震试验及标准、抗震措施等内容。

**震害** 在中国近十几年来的几次大地震中，变电所的电气设备都有不同程度的损坏。以1976年7月28日唐山地震中的电气设备损坏情况最有代表性。地震后对23个35~220 kV变电所进行了调查，不同电气设备在不同破坏烈度下的损坏率如表所示。

电气设备的震害可归纳为：①设备高大、瓷件细长的户外电气设备损坏较严重，在地震时发生瓷柱断裂现象。比较突出的是220 kV及以上的断路器，35 kV及以上的普通阀式避雷器。其它户外高压电气设备震害较轻，一般都能耐受8°地震，将结构稍加改进后可提高到耐受9°地震。②玻璃缸蓄电池抗震能力很差，在地震时几乎全部损坏。③安装在屋内的6~10 kV高压开关柜，控制、保护、信号屏等本身是可以抗震的，在地震中造成损坏的原因是房屋倒塌把屏、柜砸坏或者没有与基础固定，以致摔坏。

**震害原因分析** 在20世纪60年代以前，世界各国对电气设备的抗震研究大都停留在静态法的基础之上。静态法将地震对电气设备的作用看作是一个惯性

水平力，它作用在设备重心上，大小等于地震时设备安装地点的地面水平加速度与设备自重的乘积。它没有反映电气设备自振频率的响应因素。经过60年代的几次大地震之后，按静态法考核的电气设备损坏都比较严重，由于高压电气设备的自振频率为几个赫兹，正好与地震波的频带范围1~10 Hz比较接近，在地震时发生共振，电气设备遭受的动态地震力远大于静态力，致使瓷柱断裂。

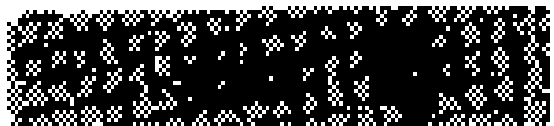
电气设备损坏情况

设备名称	破坏率(%)	破坏率(%)	破坏率(%)	破坏率(%)	破坏率(%)
220 kV 少油断路器	—	—	28.6	—	—
220 kV 隔离开关	—	—	8	—	—
220 kV 罐吹避雷器	—	—	50	—	—
220 kV 普通阀式避雷器	—	—	33.3	—	—
220 kV 支柱绝缘子	—	—	11.9	—	—
110 kV 少油断路器	0	0	7.4	22.2	—
110 kV 多油断路器	0	0	6.7	44.4	—
110 kV 隔离开关	0	0	2.5	0.78	—
110 kV 避雷器	0	0	37	66.7	—
35 kV 多油断路器	0	0	0	15	58.3
35 kV 隔离开关	0	0	2	0	0
35 kV 避雷器	0	0	4.17	22.2	33.3
玻璃缸蓄电池	—	—	75	100	100
汽车蓄电池	0	0	0	0	0



220 kV 少油断路器被震坏的情景

60年代以后，各国普遍采用动态法对地震进行研究。其一是将电气设备原型放在振动台上进行实际加振试验；其二是将电气设备看成是具有单个和多个自由度的体系，进行动态应力计算。动态法将电气设备分成两大类：第一类的自振频率很低，远离地震波的频带范围，与地震波产生共振的可能性极小，称为非共振设



备,例如主变压器本体等;第二类的自振频率与经常发生的地震波频率较接近,有可能共振,称为共振设备,例如 110 kV 及以上的断路器、避雷器、支柱绝缘子等,对它们应按动态法考核其耐震能力。

**耐震试验及标准参数** 为了定量研究高压电气设备各个部位的实际应力,研制抗震型设备,需将实际的高压电气设备放在振动台上进行加振试验。在振动台上可进行水平、垂直两个方向的加振试验。中国较为通用的耐震试验标准参数为:①地面加速度,是指地表的地震波加速度,取决于地震破坏烈度的大小,一般对抗震设备地面水平加速度取  $0.4g$  ( $g$  为重力加速度),垂直加速度取  $0.2g$ 。②输入地震波的波形、振动频率、加振时间,由于电瓷产品属于脆性材料制品,损害程度主要取决于反应加速度的幅值,与波形关系不大,因此取输入波形为正弦波,振动频率等于电气设备的固有频率,加振时间为 3 周期或 5 周期构成的拍频,激发 5 次。③安全系数,地震荷载属于突发性瞬时荷载,按电瓷产品的荷载条件规定,安全系数取为 1.67,即高压电气设备产生的最大地震动态力应小于电瓷破坏应力的 1.67 倍。

**电气设备的抗震措施** 针对电气设备在地震时损害的不同情况,所采取的抗震措施主要分为加强设备与基础之间的固定和采用抗震型高压电气设备两大类。

(1) 加强设备与基础的固定。针对非共振设备而言,主要是主变压器,各种控制、保护、通信、远动屏柜以及蓄电池等。它们损坏的直接原因是设备与基础之间没有固定或固定不良,以致从基础上位移、倾倒而损坏。方法是:①主变压器或所用电变压器底部与基础之间采用螺栓固定;②所有保护、控制、直流、所用电屏柜与基础上的预埋钢板之间采用焊接固定;③远动、通信装置与基础之间采用压板固定;④蓄电池之间采用夹板固定。

(2) 采用抗震型高压电气设备。是针对共振电气设备而言,主要是高压断路器、隔离开关、棒型支柱绝缘子和避雷器等具有细长绝缘瓷套管的 110 kV 及以上的高压电气设备。地震时它们可能发生共振,产生较大的动态应力,要从其本体出发考虑抗震措施:①采用高强度的绝缘瓷套管。例如日本对 500 kV 电气设备都采用高强度的绝缘瓷套管,其破坏强度是普通瓷套管的 1.5 倍。中国抗震型 220 kV 六氟化硫断路器也采用了高强度绝缘瓷套管,它的破坏强度是普通瓷套管的 1.45 倍。②在高压电气设备的底部安装各种型式的阻尼器,增加设备的阻尼系数,减弱动态反应程度,达到抗震目的。如中国抗震型 500 kV 六氟化硫断路器。③采用抗震型结构。例如日本各电压等级的落地罐式六氟化硫断路器,苏联以及中国的一种抗震型 500 kV 隔

离开关,每一个支柱由 3 个棒形支柱绝缘子组成三角锥体形状的框架结构,具有很强的抗地震能力。

(蓝增廷)

dianqi zhujiexian

**电气主接线** (main one-line diagram; main electrical connection scheme)

根据电能输送和分配的要求,表示主要电气设备相互之间的连接关系,以及本变电所(或发电厂)与电力系统的电气连接关系,通常以单线图表示。电气主接线中表示的主要电气设备有发电机、电力变压器、断路器、隔离开关、电压互感器、电流互感器、避雷器、母线、接地装置以及各种无功补偿装置等。常用的主接线方式有:单母线接线、单母线分段接线、单母线分段带旁路母线接线、双母线接线、双母线带旁路母线接线、双母线分段接线、双母线分段带旁路母线接线、一个半断路器接线、三分之四断路器接线、双断路器接线、桥形接线、多角形接线等。电气主接线中有时还包括发电厂或变电所的自用电部分,常称作自用电接线。

**要求** 电气主接线通常是依据变电所或发电厂在电力系统中的地位和作用,首先满足电力系统的安全运行与经济调度的要求,然后根据规划容量、供电负荷、电力系统短路容量、线路回路数以及电气设备特点等条件确定,并具有相应的可靠性、灵活性和经济性。此外,对于变电所和发电厂的电气主接线还有一些不同的或共同的具体要求。

对变电所电气主接线的具体要求 主要包括:①变压器的台数和容量能满足规划期间供电负荷的需要,并能满足当变压器故障或检修时供电负荷的需要。联络变压器的容量能满足电力系统中交换功率的要求。②当变电所中出现三级电压且中压或低压侧负荷超过变压器额定容量的 15% 时,通常便采用三绕组变压器。③电力系统中无功功率需要分层次分地区进行平衡,变电所中常需装设无功补偿设备,例如并联电容器或同步调相机等。当有三绕组变压器或自耦变压器时,这些无功补偿设备则连接到变压器的第三绕组上。④在 330~500 kV 系统是否装设并联电抗器,要决定于限制工频过电压的要求,但通常也结合电力系统并列操作、避免发电机自励磁或低压并联电抗器不能平衡无功功率等因素来决定。⑤当母线上电压变化比较大而且不能用增加无功补偿容量来调整电压时,为了保证电能质量,则采用有载调压变压器。⑥如果不受运输条件的限制,变压器采用三相式,否则选用单相变压器组,并且根据需要设置一台单相备用变压器,或结合地区运输条件设置一台公用的单相备用变压器。⑦对 220 kV 及以上的联络变压器通常采用自耦变压器。



对发电厂电气主接线的具体要求 主要包括：①在正常运行方式下能送出全部发电机组的容量。②主接线与电力系统连接的电压要由发电机组容量、供电负荷情况、输电距离与输电容量等因素确定。此外，还要考虑到大容量发电机组在提高电力系统暂态稳定中所起的电压支撑作用。发电厂中主接线的电压等级 通常不超过两级。为了简化电气主接线，大容量发电机组常通过发电机-变压器-线路单元接线方式直接接入较近的变电所。③在两级电压主接线之间是否要设置联络变压器，需要从整个电力系统角度来统一考虑，但要避免因为电磁环网而影响电力系统的稳定。④当主接线中电气设备发生故障时，允许断开的发电机组总容量要服从电力系统的要求。

对变电所和发电厂电气主接线的共同要求 主要包括：①各级电压的规划短路容量不能超过所采用的断路器的断流容量。②各级电压主接线的可靠性要与电力系统的可靠性相协调。当任一电气设备发生单一故障时，要避免电力系统发生非同步运行，避免发生频率崩溃和电压崩溃的事故。③为了避免破坏电力系统运行稳定和便于电力系统在发生事故后能迅速恢复正常运行，在确定主接线时需要考虑以下的可能情况：故障时断路器拒绝动作；故障时继电保护装置和自动装置误动作；发生多重性故障。④各级电压的架空出线包括同一级电压的架空出线应避免交叉。⑤能够适应分期建设和方便扩建。

**发展概况** 主接线方式主要根据各级电压母线在电力系统中所处的地位和作用予以选定。电力系统中电压高的母线集结、输送的容量也比较大，发生故障时影响范围广，要求采用可靠性高的接线方式。各种主接线方式所用断路器的数量均与进出线的数量有一定关系，如进出线总数以  $n$  表示，则所用断路器的数量分别为：桥形接线为  $n-1$ ，单母线接线为  $n$ ，单母线分段接线为  $n+1$ ，单母线分段带旁路母线接线和双母线带旁路母线接线为  $n+2$ ，双母线分段带旁路母线接线为  $n+5$ ，一个半断路器接线为  $1.5n$ ，三分之四断路器接线为  $4n/3$ ，多角形接线为  $n$ ，双断路器接线为  $2n$  或  $2n+1$ 。因此，单母线、单母线分段、单母线分段带旁路母线的接线仅适用于对可靠性要求较低、进出线回路数较多的 110 kV 及以下的电压等级；双母线、双母线带旁路母线的接线则多用于在电力系统中有一定重要性的 35~220 kV 母线；对 220~500 kV，则根据在电力系统中的地位采用双母线、双母线带旁路母线、双母线分段带旁路母线或一个半断路器的接线；对进出线回路各为二个，在电力系统中不重要的用户变电所，通常采用桥形接线或线路变压器组接线；对 750 kV 电压，断路器昂贵，当一个变电所中进出线很少（如三回

或最多不超过四回）时，通常采用多角形接线（三角或四角），如进出线回路数量较多，则采用一个半断路器或采用既保证较高可靠性又少用断路器的三分之四断路器接线（如苏联的札布罗什变电所）。

近年来许多国家已经开始用可靠性计算方法来对不同主接线方式作出定性和定量的分析（见电气主接线），并将建立各种设备的可靠性数据库作为可靠性计算的基础。此外，还用变动设备的可靠度来进行主接线可靠性的敏感性分析，以免因数据统计有误差而得出错误的结论。

**参考书目**

西北电力设计院编，发电厂变电所电气接线和布置，北京：水利电力出版社，1984

（尤国铭）

dianqi zhuangzhi fanglei

**电气装置防雷** (lightning protection of electrical equipment)

包括对直击雷过电压的保护、对感应雷过电压的保护以及对侵入波的保护三个方面。统计数字表明，电力系统正常运行遭破坏的直接原因，很多是由于发生雷电过电压。雷电过电压可以损坏发电机、变压器、断路器和其它电气设备的绝缘，可以使架空输电线路的绝缘子闪络面引起线路跳闸，严重时会造成绝缘子碎裂、导线烧断，还会使木质杆塔劈裂。常用的防雷装置有避雷针、避雷线和避雷器，以及相应的防雷接地装置。

防止架空电力线路遭受直击雷或感应雷危害的基本措施是装设避雷线，降低杆塔的接地电阻和合理地提高线路的绝缘水平。为减少线路的雷击跳闸次数，可采用系统中性点经消弧线圈接地的工作方式。为避免雷击跳闸造成的供电中断，可采用自动重合闸的运行方式。（见线路防雷）

发电厂或变电所电气装置对直击雷过电压的防护主要采用避雷针（或避雷线），对侵入波的防护采用进线保护和避雷器保护的综合措施，即用进线保护限制进入变电所的雷电流的幅值和陡度，用避雷器限制作用在电气设备上的雷电过电压幅值。旋转电机的绝缘水平远低于变压器等电气设备，一般直配电机的侵入波保护采用由磁吹避雷器（或金属氧化物避雷器）、电容器、电抗器和电缆段组成的专门接线方式。（见变电所防雷、旋转电机防雷）

配电线路的绝缘水平较低，一般不采取防直击雷和感应雷的措施，而用减小建弧率及自动重合闸的办法来减轻雷电的危害，减少停电次数。配电变压器的防雷保护主要靠避雷器来实现。（见配电变压器防雷）

电气装置防雷的研究可在高电压实验室进行，并

可用防雷分析仪和专门的计算机程序。雷害事故的分析,运行经验的积累以及对雷电的深化认识也十分重要。在具体选择防雷保护方案时,需按本地区的雷电活动情况、本系统的结构特点以及运行方式,并结合运行经验,进行充分的技术经济比较后确定。

(陈慈莹)

dianrong chuandi guodianya

电容传递过电压 (capacitance - transfer overvoltage)

当变压器的高压绕组或高压线路中出现对地的零序电压,通过电容联系而传递到低压绕组或低压线路所形成的过电压。产生零序电压的原因,是由于断线、断路器的不同步分合、不对称接地故障或者发生谐振现象。

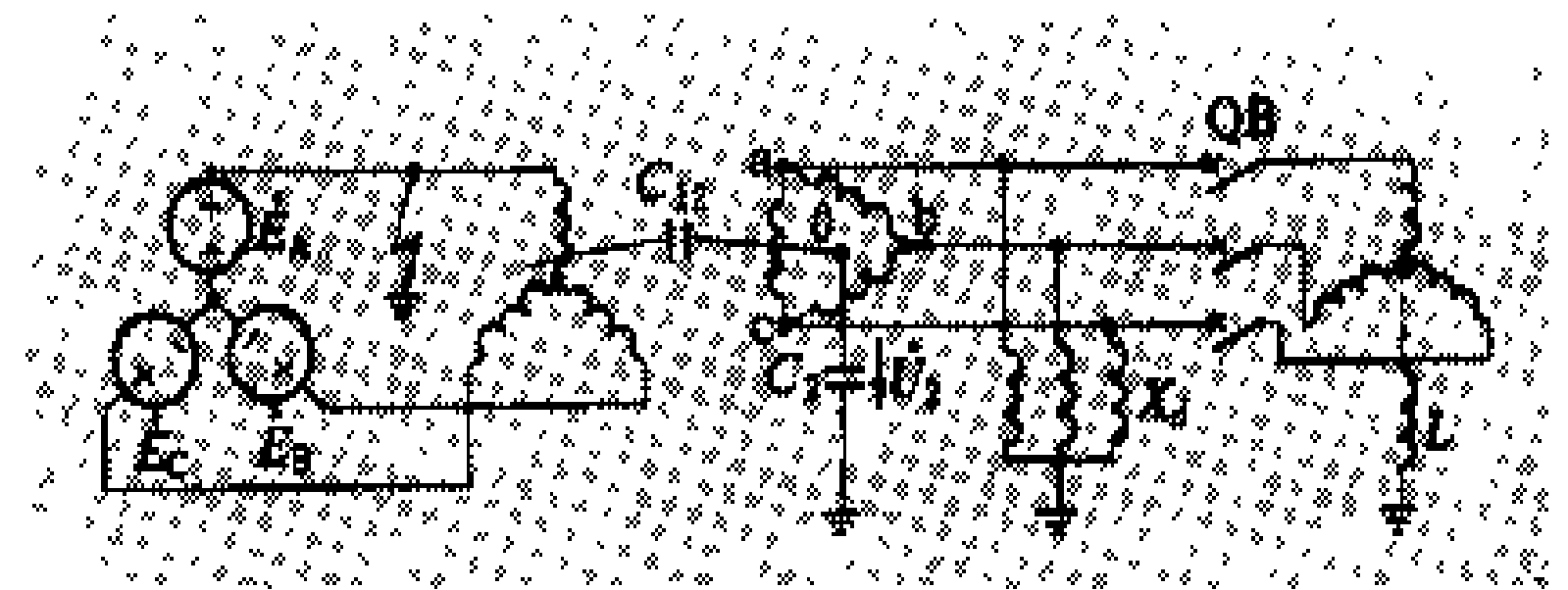


图1 变压器高压绕组A相接地的电压传递接线图

绕组间的电压传递 绕组间的稳态传递过电压主要在高低压绕组的中性点均不直接接地的变压器中产生。图1中变压器高压绕组的A相接地,零序电压为 $-\dot{E}_A$  (见图2),它在高、低压绕组间电容 $C_{12}$ 和低压绕组对地电容 $C_2$ 之间进行分压,使得低压侧产生零序电压分量

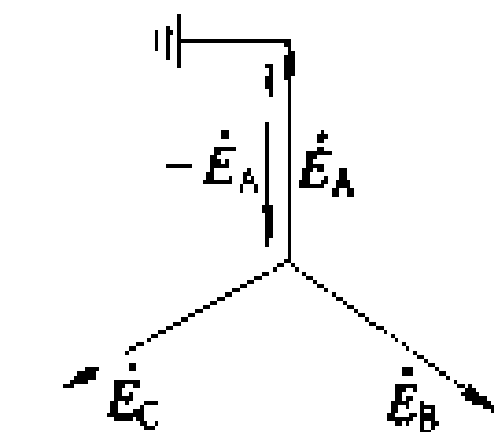


图2 高压侧电压相量图

$\dot{U}_2$  为

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}_A \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2}$$

当低压侧开路 (断路器 QB 分闸), 杂散电容  $C_2$  很小, 相对于低压侧的额定相电压  $\dot{E}_a$ 、 $\dot{E}_b$  和  $\dot{E}_c$  来说,  $\dot{U}_2$  可能很大, 它们叠加的结果 (见图3), 可能一相 (a 相) 对地电压降低而另两相电压升高, 也可能三相电压同时升高 (c 相电压  $\dot{U}_c$  最高), 从而危及低压绕组的绝缘。当低压侧接有电磁式电压互感器, 其感抗  $X_d$  大于  $1/[\omega(C_0 + 2C_{12})]$  时, 会在传递回路中发生铁磁谐振, 使得  $\dot{U}_2$  与  $\dot{E}_A$  反相 (图3中的虚线), 此时 a 相对地过电压最高。

低压绕组与发电机相连 (QB 闭合) 后, 发电机的

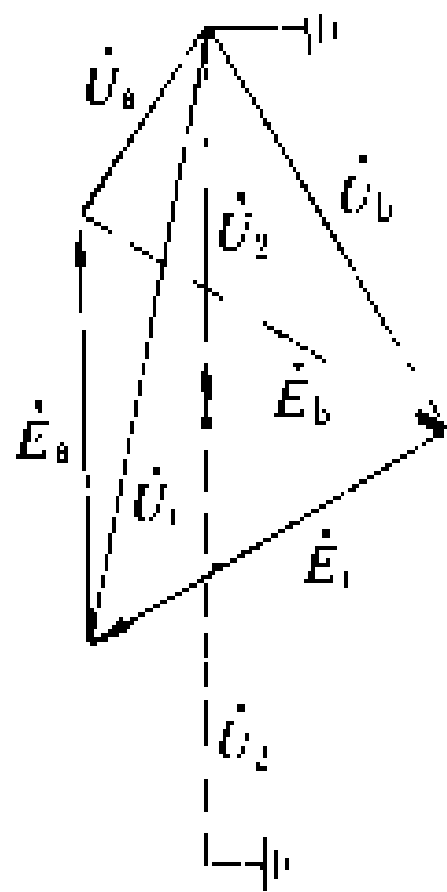


图3 低压侧电压相量图

对地电容很大, 传递电压  $\dot{U}_2$  和相应的发电机对地过电压很低。但是, 当发电机的中性点接有消弧线圈 (其电感为  $L$ ), 并与  $C_2$  全补偿而发生并联谐振时, 零序电压将全部传递过来。过补偿的  $\omega L < \frac{1}{\omega C_2}$ , 传递回路接

近于串联谐振; 欠补偿的  $\omega L > \frac{1}{\omega C_2}$ , 可能发生工频铁

磁谐振。无论是产生串联谐振还是铁磁谐振, 都将在二次侧产生很高的对地过电压, 危及发电机绕组的绝缘。

为了避免产生传递过电压, 如果断路器 QB 可能长期分闸, 可在变压器低压侧投入一组对地电容。在 QB 闭合和发电机中性点接有消弧线圈时, 可以增大消弧线圈的脱谐度, 以使传递电压低于容许数值。

线路间的电压传递 图4中的线路 I、II 为中性点不接地的高、低压线路, 它们为同杆架设或者靠得很

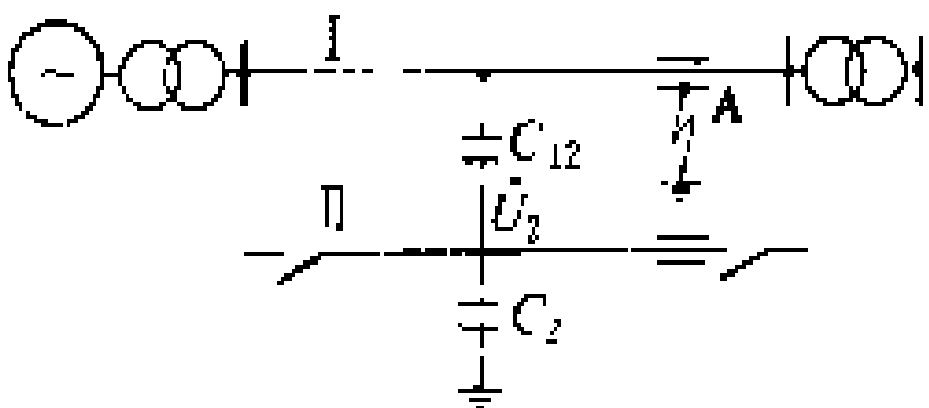


图4 高压线路A相接地时的电压传递接线图

近。当高压线路单相 (A 相) 接地时, 对地零序电压为  $-\dot{E}_A$ ,  $\dot{E}_A$  为接地前的 A 相电动势。令高、低压三相线路间的耦合电容为

$C_{12}$ , 当低压线路处于开路状态, 其二相对地总电容为  $C_2$ , 则通过耦合电容传递到低压线路的零序电压仍可用上述  $\dot{U}_2$  的分压公式表示。由于  $\dot{E}_A$  的幅值要比低压线路的额定电压高得多, 故传递的结果会在低压线路中产生很高的对地过电压。

为了保护低压线路, 可在其三相导线对地间接入三相电容器组, 而在低压线路开路情况下, 也可将其三相导线临时接地。

参考书目

陈维贤, 内部过电压基础, 北京: 电力工业出版社, 1981

(陈维贤)

dianya fenbu shiyan

电压分布试验 (voltage distribution test)

测量绝缘子串在工频电压作用下沿串各片绝缘子上所承受的电压的试验。由于绝缘子对周围物体 (主要是接地的铁塔和带电的导线、金具等) 杂散电容的影响, 使沿串作用的电压分布不均匀, 最靠近导线的绝缘子上承受的电压最高, 有可能产生电晕放电, 并伴随产生无线电干扰和可听噪声, 严重时还会加速绝缘子老化。设计线路时, 总是设法使绝缘子串上电压分布尽可能均匀, 使单片绝缘子上承受的最高电压不超过规定值。通过试验, 可以根据测量结果决定是否采取均压

措施及均压环的型式,从而为工程设计提供依据。

测量方法有两类,一是小球法或氦管、光纤法,二是电压表法。前一类方法是将放电电压一定的一对小球间隙或起辉电压一定的一支氦管依次跨接在每片绝缘子上,并升高加在绝缘子串上的电压,直至球隙放电或氦管起辉。根据这些电压可以计算出绝缘子串上的电压分布情况。小球法的缺点是球隙的放电电压受气温、气压、湿度等因素影响,击穿电压分散性大,而且观察放电的误差较大,影响试验结果。氦管、光纤法将起辉信号用光纤直接传送给操作人员,从而避免了上述缺点,但由于氦管的起辉电压低,施加在绝缘子串上的电压也须低,不能反映高压下电晕等实际存在因素的影响。电压表法是在绝缘子串上施加一定的电压,用特制的电压表(体积小、输入阻抗高)直接测量各片绝缘子上的分布电压,测量数据可通过望远镜直接观测或通过光纤传送给测量人员。电压表法比较快速简便,且可直接测量运行中绝缘子串上的电压分布,但所用仪表的费用高于前一类。

(邵方殷)

dianya huganqi

**电压互感器** (potential transformer) 电力系统中将一次侧交流高电压转换成可供测量、保护或控制等仪器、仪表或继电保护装置使用的二次侧低电压的变压设备。电压互感器的一次绕组,通常与需测量、保护或控制的电路并联,二次绕组则与测量、保护或控制装置的电压线圈连接,使一、二次侧高、低压电路互相隔离。正常使用时,电压互感器的变比约等于一、二次侧额定电压之比,即一、二次绕组的匝数比。两侧电压间的相位差接近于零。

**类型** 按结构原理的不同通常可分为电磁式电压互感器和电容式电压互感器两大类;按用途不同可分为单相或三相电压互感器、双绕组或三绕组电压互感器、户内式或户外式电压互感器;按绝缘介质不同可分为树脂浇注式电压互感器、油浸式电压互感器和六氟化硫气体绝缘式电压互感器等。

**电磁式电压互感器** 常用的有油浸式电压互感器和树脂浇注式电压互感器,此外还有与气体绝缘金属封闭电器组合用的六氟化硫气体绝缘式电压互感器。通常是在共用的铁芯上绕有一次绕组和1~3个二次绕组。一般测量和保护共同利用一个二次绕组,为提高测量精度,便分设两个二次绕组,也有的电压互感器再另设一个附加二次绕组,在其外部接成开口三角形,供接地保护用。

(1)油浸式单相电压互感器。一种具有钢制油箱和瓷套管结构的单相电磁式电压互感器。10kV级的通

常为户内式,只有一个二次绕组,没有供接成开口三角形的附加绕组。这类电压互感器的额定电压为线电压,并具有二只相同的高压套管,可用以测量某一线电压,或按V-V接线接测量线电压的仪表或继电器。也可将三台油浸式单相电压互感器接成星形,并将一次绕组中性点接地,用来测量相电压或线电压。35kV级的通常为户外式,可具有两个二次绕组,其一供测量和保护用,另一个为附加绕组,供接地保护用。这类互感器的额定电压为相电压,并有一只高压套管和一只接地套管,可供接成星形。

(2)油浸三相五柱式电压互感器。一种具有油箱和三相三绕组五个铁芯柱的电磁式电压互感器。这种电压互感器广泛应用于10kV及以下屋内配电装置。它有两个边柱铁芯,可作为零序磁通的通路,在系统发生单相接地故障时,其铁芯发热程度要比三相三柱式电压互感器为轻。它有两个二次绕组,其一接成星形,供测量和保护用,另一个为附加绕组,供接地保护用。三个高压绕组的接线端和中性点均经套管引出。

(3)油浸串级式电压互感器。一种具有油箱和一次绕组为串级绝缘的单相电磁式电压互感器。串级式电压互感器适用于中性点有效接地系统,目前主要用于110kV和220kV电力系统中。110kV串级式电压互感器的一次绕组分为两段,每段各为一个绝缘分级,上端全绝缘,下端接地,两段一次绕组分别绕在口字形铁芯的上下柱上,两段绕组之间与铁芯相接,铁芯不接地。铁芯对地的电位为一次绕组电压的1/2,而一次绕组各部分与铁芯的最大电压差只有一次绕组电压的1/4。一次绕组的末端接地。二次绕组是集中绕制在最下一个铁芯柱上。220kV串级式电压互感器是由两个110kV串级式电压互感器单元叠加而成的。

(4)树脂浇注式电压互感器。一种以树脂浇注成型的电磁式电压互感器。一般为环氧树脂全密封浇注,不需要其他外壳。这种电压互感器的优点是体积小,重量轻,耐潮湿,耐污秽,常用于户内10kV及以下的配电装置,其绕组的配置与油浸式的相同。

**电容式电压互感器** 由电容分压器和电磁单元(电磁式电压互感器)构成,一般为单相油浸式。电容分压器是由若干只电容器串联组成的,接于高压导线与地之间,可通过载波通信电路接地或直接接地。从电容分压器适当位置引出的中压端子与电磁单元连接。电容分压器和电磁单元可分装成两个独立的部分,常称分离式;也可将电容分压器叠装在电磁单元之上,常称单柱式。分离式的结构较松散,但便于检修;单柱式的结构紧凑,检修则不便。电容式电压互感器,除具有电磁式电压互感器作用外,电容部分还可兼作耦合电容器,供高频载波通道使用。在110kV及以上的屋外

配电装置中广泛采用电容式电压互感器。此外,还有由电容分压器和电子放大器构成的电容式电压互感器,一般用作气体绝缘金属封闭电器的组成部分。

**工作原理** 电磁式电压互感器的工作原理与作降压用的电力变压器类似,由于仅是借助电磁感应作用传递电压信息,因此在正常工作时其容量很小。电磁式电压互感器的测量误差,包括电压误差和相位差,不仅与励磁电流有关,而且也与一次电压的变动状况和负荷大小有关。电压误差是由于实际电压比与额定电压比不同产生的,其值为: $\Delta u(\%) = [K_n(U_2 - U_1)/U_1] \times 100(\%)$ ,式中  $K_n$  为额定电压变比,  $U_1$  和  $U_2$  为一次和二次电压实测值。相位差  $\delta$  是实际的一次电压相量与转过  $180^\circ$  的二次电压相量间的夹角。

电容式电压互感器的电容分压器的中压端子与电磁单元一次绕组相连,使其二次绕组的输出电压与施加到电容分压器上的一次电压成正比,相位差接近于零。电容式电压互感器的误差取决于内部阻抗的电压降,并随电源频率和环境温度的变动而变化。

**参数及特性** 电压互感器的参数及特性主要有:额定值、准确级、暂态特性、铁磁谐振及其阻尼等。

**额定值** 额定一次电压和额定二次电压值是电压互感器的基准值。额定一次电压为标准中规定的系统或设备的额定电压,额定二次电压有 100 V、 $(100/\sqrt{3})$  V、 $(100/3)$  V 等。电压互感器的容量通常为 15~1000 V·A。

**准确级** 在规定的使用条件下,其电压误差和相位差不超过规定等级的限值。测量用电压互感器的准确级有 0.1、0.2、0.5、1、3 级等,保护用电压互感器的准确级有 3P、6P 级等。

**暂态特性** 超高压电力系统中装设有高速动作的继电保护装置,当系统发生短路故障时,要求二次电压立即衰减。但因电容式电压互感器具有电容和电感等储能元件,在其一次侧发生对地短路时,回路中可能产生低频衰减振荡。通常规定在一次接线端子与接地之间的电源短路后,要求二次输出电压在额定频率的一个周期内衰减到短路前电压峰值的 10%。

**铁磁谐振及其阻尼** 因电容式电压互感器装有电容分压器、带铁芯的补偿电抗器和电磁式电压互感器,具有产生铁磁谐振的条件,因此标准规定:在负荷为零二次侧短路后又突然消失时,在额定频率的 10 个周期内,二次电压峰值应恢复到与短路前正常值相差不大于 10% 的电压值,铁磁谐振的持续时间不超 2s。为此,通常在电压互感器的附加绕组的出线端子间装设阻尼器。阻尼器的型式有固定接入电阻型、谐振型、饱和电抗型和电子型等。

**运行使用要求** 主要有:①电压互感器有供中性

点有效接地系统使用和供中性点非有效接地系统使用之分,两者在铁芯设计上有很大差异,要针对系统条件选用。②在中性点非有效接地系统中,当中性点接地的电磁式电压互感器接于空母线时,母线对地电容与电压互感器的非线性电感有可能发生并联谐振过电压。通常是在电压互感器的附加绕组回路接入阻尼电阻以防止,亦可用调整母线对地电容与电压互感器非线性电感的配合条件的办法来消除。③在中性点有效接地系统中,当使用带断口均压电容器的断路器开断空载线路时,断路器的断口均压电容、母线对地电容和电磁式电压互感器的非线性电感有可能发生串联谐振。通常要通过改变系统操作方式、适当选择电压互感器的励磁特性、在中性点接地的电压互感器二次绕组或附加绕组内加阻尼电阻等办法予以抑制。④二次绕组和附加绕组的一端要接地,防止二次侧出现高电位危及设备和人身安全。

**现状与发展** 目前在超高压电力系统中多采用电容式电压互感器。电磁式电压互感器主要用于 110 kV 及以下的电力系统中。六氟化硫气体绝缘式电压互感器和将电压互感器与电流互感器装在同一外壳内的组合式互感器,正在得到发展。电子式电压互感器和光电式电压互感器,是正在研制的新型电压互感器,其主要特点是尺寸小、重量轻、性能稳定和运行可靠。

参见彩图插页第 20 页 60 图。

(蒲文宗)

dianya huganqi baohu guodianya  
**电压互感器饱和过电压** (overvoltage due to potential transformer saturation) 电磁式电压互感器由于铁芯磁饱和引起的铁磁谐振过电压。在中性点不接地和直接接地的电力系统中均有可能发生。

中性点不接地系统中电压互感器的饱和过电压  
图 1 中电源变压器的中性点不接地,电压互感器的中

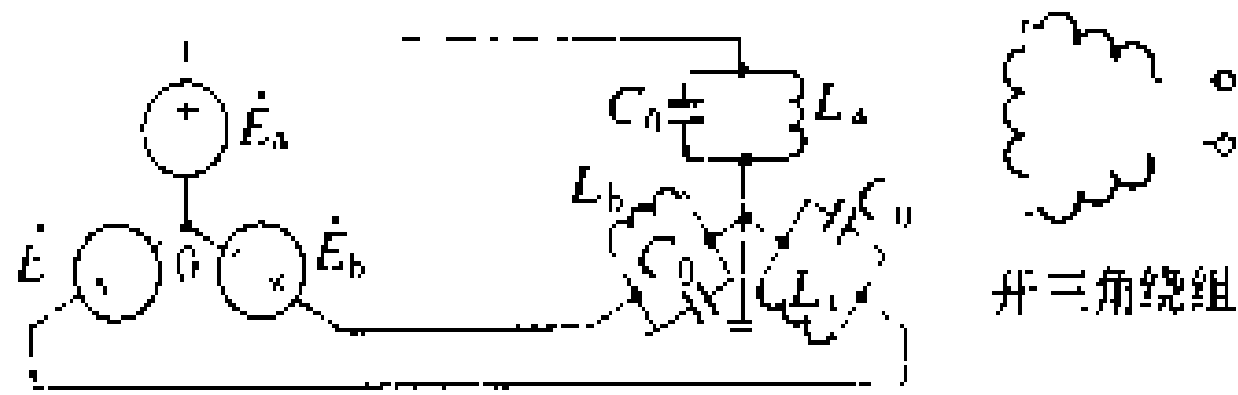


图 1 中性点不接地系统中三相电压互感器的谐振接线图

性点直接接地,其励磁电感  $L_a$ 、 $L_b$  和  $L_c$  分别与导线和母线的对地电容  $C_0$  相并联而形成谐振回路。无论是电源合闸至空载母线所引起的电压互感器的涌流现象,还是线路中发生对地闪络和熄弧后  $C_0$  中残余电荷经电压互感器放电所引起的磁饱和现象,都会有一定的

$C_0$  值下激发起谐振过电压,它表现为电力系统中性点发生位移,并全部反映至开三角绕组,引起虚幻的接地故障信号。这是配电网中造成事故最多的一种内部过电压。

由于铁磁谐振的零序性质,故导线的相间电容和传输的三相有功负荷均对谐振不起影响。

随着  $C_0$  的增加(即导线增长),将依次发生高频、工频和分频谐振,相应地依次产生高频、工频和分频谐振过电压。空载母线合闸时  $C_0$  很小,会产生三倍以上的高频谐振过电压。较大的  $C_0$  值则会出现工频谐振过电压,此时一相对地电压很低,其他两相的对地电压接近于线电压,故发生工频谐振与单相接地现象往往难以区别。在系统出线较长时(此时  $C_0$  很大),将会发生分频谐振,其频率略低于电源频率的一半(此时电压表的指针将发生低频摆动),谐振电压分量的有效值(开三角电压)接近于相电压,由于此时励磁感抗减半,电压互感器趋于深度饱和,励磁电流急剧增大,甚至高达额定值的百倍以上,从而造成电压互感器的发热、喷油甚至爆炸。在高频和分频谐振时,三相对地电压是同时升高的。

人为地增大对地电容使之超过某一临界值,可使回路越出谐振区域。在开三角绕组端部并接一个小电阻、临时短接开三角绕组或将电压互感器的高压中性点经大电阻接地,均可吸收零序能量而抑制谐振。将电源变压器的中性点通过消弧线圈接地或临时直接接地、将电压互感器的高压中性点临时不接地,均可使谐振现象不会发生。

中性点直接接地系统中电压互感器的饱和过电压 110~220 kV 变电所中普遍设置带有断口并联电容  $C$  的断路器(见图 2),

母线上接有电磁式电压互感器(其电感为  $L$ ),  $C_0$  为对地杂散电容。当断路器 QB1 分闸或隔离开关 QD2 合闸时,电压互感器中会出现涌流而激发起铁磁谐振。长时间的饱和电流将损坏电压互感器,在 QB1 重新合闸时还会发生电压互感器烧毁或爆炸事故。

由于电力系统和电压互感器的中性点直接接地,这种谐振具有正序和负序性质,故若将电压互感器的开三角绕组短接或将其高压中性点对地绝缘,只能减小铁磁谐振出现的概率而不能完全消除铁磁谐振。人为地增大  $C_0$  值可以抑制谐振,但代价高昂。原则上可在电压互感器的高压绕组对地间并接高值电阻,或在

其低压绕组端部并接小电阻,或与高压绕组串接一个阻尼电阻,以使谐振发展不起来。此外,运行中尽量避免形成上述谐振回路,具体措施如在 QB1 和 QD2 分合操作之前事先切除电压互感器。

(陈维贤)

dianyun shiyan

**电晕试验 (corona tests)** 确定输电线路导线及金具由于电晕放电而产生的能量损失、无线电干扰、可听噪声以及可见电晕电压等效应有关特性的试验。试验的目的主要是为了合理选择导线结构(包括每相导线根数、分裂导线布置和子导线直径等)及金具形状。

**电晕损失试验** 通常在试验线段上或电晕试验室中进行。由于线路电晕损失与气象条件关系很大,坏天气时的电晕损失是好天气时的几十倍或更大,为此要求进行不同气象条件下较长时期的连续测量。对电晕损失测量方法和测量仪器的要求是,要在功率因数很小的情况下,能正确指示电晕损失值。通常采用的方法是西林电桥法,它不仅能测量试验线段的电晕损失,也能测量绝缘子串的电晕损失。对于已运行的实际线路,可采用耦合天线法进行测量。美国早期一些研究者还用功率表法。

**无线电干扰测量** 在高压试验场内测量试验线段的无线电干扰可以采用天线法或回路法。用天线法测量时,测量点选择在试验线段档距中央垂直于线路走向距线段一定距离处,用国际标准规定的无线电干扰仪测量该点的干扰场强。改变测量位置,重复测量,做出干扰场强的横向分布特性。由于试验线段长度有限,电晕产生的干扰脉冲沿线传播时在线段端部产生反射,因此,将测量结果用于实际线路时,需经换算。用回路法测量是通过接在试验线段上的耦合电容器吸取导线上电晕放电产生的干扰电流脉冲,测量该电流脉冲在一个阻值为  $300\ \Omega$  的电阻上的压降,该压降值即反映了被试线段上电晕干扰的水平。测量电路见高压电器无线电干扰试验。

**可听噪声的测量** 电压超过 500 kV 的交流输电线路和电压为 500 kV 及以上的直流输电线路,在选择导线结构时,需要进行可听噪声的测量。低于上述电压的交直流输电线路在满足无线电干扰限值的要求后,对可听噪声限值的要求也自然满足,故一般不进行可听噪声的测量。可听噪声的测量可对实际输电线路进行,也可对试验线段进行。测量仪器有声级计(配有频率计权网络模拟人耳对纯音的平均响应)、麦克风 and 频率分析仪等。通常需在线路档距中央沿垂直于线路走向选定若干点,测出该点由导线电晕产生的可听噪声,

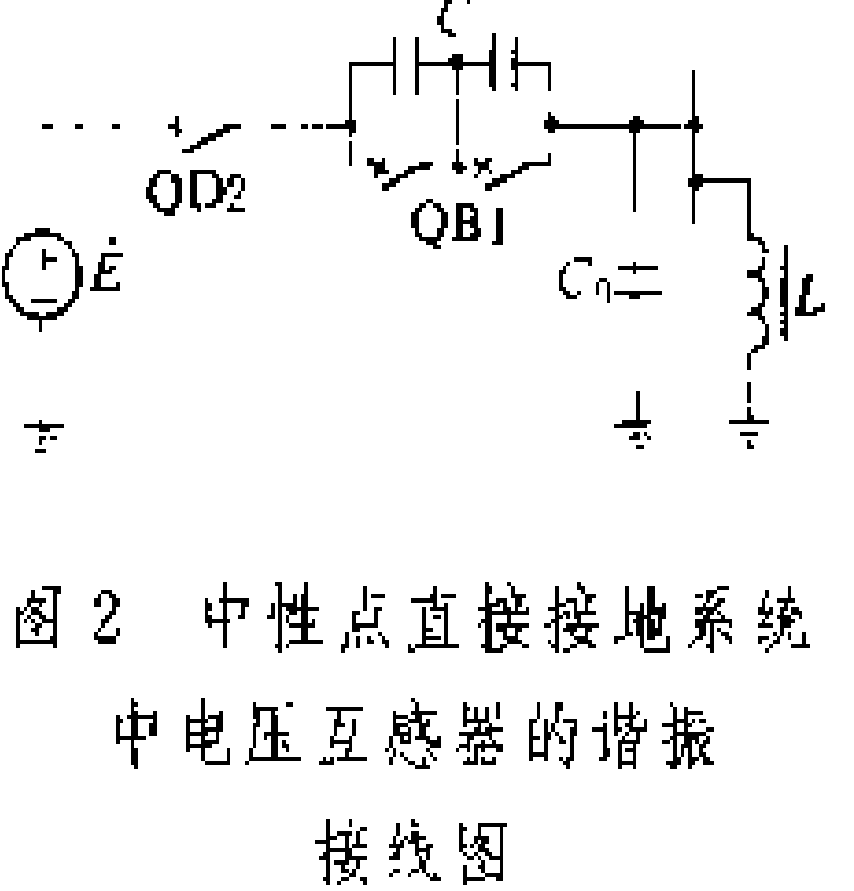


图 2 中性点直接接地系统中电压互感器的谐振接线图

做出可听噪声的横向分布曲线。

可见电晕电压的测定 试验在遮黑的试验室内进行,电晕放电的开始和熄灭可用夜视仪、望远镜或人眼直接观察。具体步骤是:被试品按实际运行情况布置,逐渐升高加在被试品上的电压,直至电晕比较明显且稳定后,维持该电压 5 min。再逐渐降低电压至该电压的 30%左右,再次升高电压至初始值。如此反复三次,每次升压读取被试品上电晕刚出现的电压值作为电晕起始电压,每次降压过程读取电晕刚熄灭的电压值作为电晕熄灭电压,以三次电晕熄灭电压的平均值作为该设备的可见电晕电压。一般要求干燥状态下的可见电晕电压不大于设备正常运行时的最高电压。

参考书目

[美] 安德生等著,超高压输电线路,西南电力设计院科技情报组,北京电力设计院情报组译,北京:水利电力出版社,1979

[苏] 米里尼科夫等,330~500 千伏架空输电线路电气部分的设计,湖北省高压协作组,华东电力设计院系统室译,北京:水利电力出版社,1977

(邵方殷)

电晕试验笼

电晕特性的专用试验装置。通过架设 1:1 的试验线段来研究导线的电晕特性,花费比较大,更换导线的工作比较繁重,并使试验周期拖长。由于导线电晕放电仅发生在紧贴导线周围的局部空气中,所以只要能使导线附近的电场与实际线路的相似,即可满足导线电晕特性研究的要求。交流架空输电线路发生电晕时产生的空间电荷只在工频电压的正、负半周内往复运动于导线周围,电晕试验笼的存在并不改变空间电荷的分布状况。

电晕试验笼用钢骨架和钢丝网制成,截面为长方形或圆形,长度为十几米至数十米,笼的两端设置悬挂导线的装置,被试导线悬挂在笼内的水平方向的中轴线上。笼放置于地面或支撑物上,与大地形成电气连接。由于接地的笼壁与导线的距离要比实际线路与大地的距离小很多,所以在施加电压比实际线路上的电压低很多时,被试导线表面和其周围的电场强度就可达到与实际线路相同的数值。在电晕试验笼轴向的两侧,还可装备人工降雨装置,用以研究雨中的电晕特性,这也是试验线段所不能做到的。所以,采用电晕试验笼进行分裂导线的电晕特性研究,具有灵活、节省和试验周期短等许多优点。

用电晕试验笼进行交流输电线路导线电晕特性试验研究已为国际所公认,但直流架空线路导线发生电

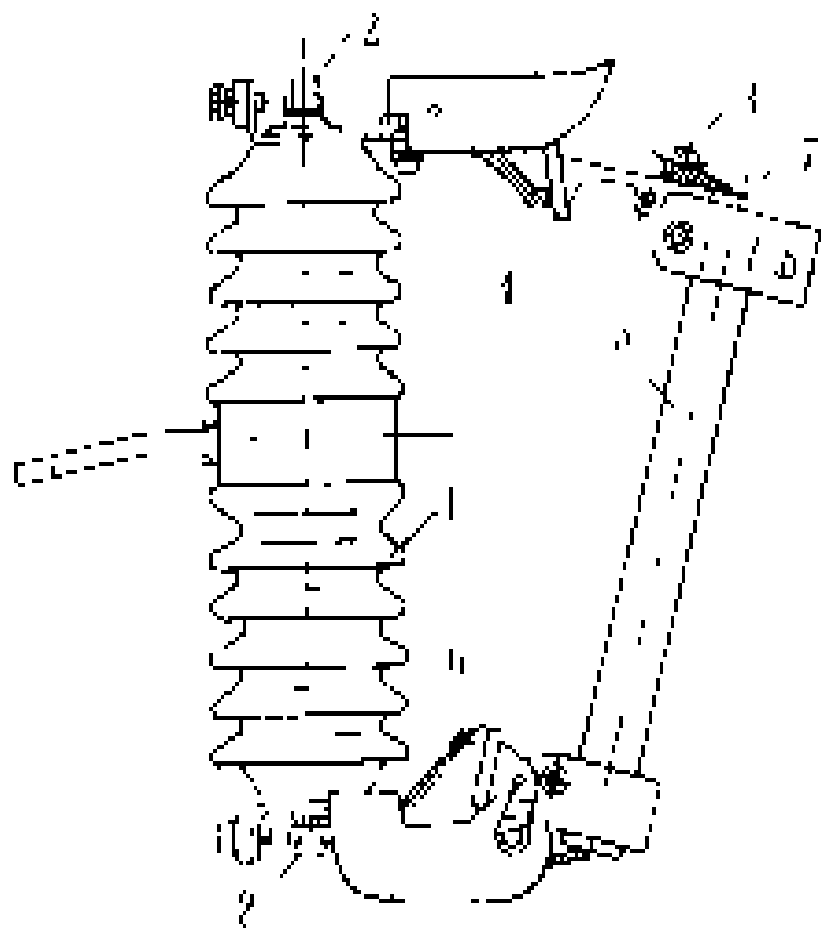
晕时,空间电荷充满导线与大地之间的整个空间,用电晕试验笼进行试验的等价性目前还有争论。

(杨吟梅)

跌落式熔断器

(drop-out fuse) 一种主要用于户外作为过电流保护用的熔断器。在熔丝元件熔断后,熔丝管在其机构和自身重量作用下,绕着支座向下跌落,使熔断器的下接触(与被保护电器连接端)与熔断器的上接触(电源端)之间形成一个明显的隔离断口,显示开断状态。

结构和工作原理 跌落式熔断器由绝缘支架、熔丝管和熔丝元件、上接触、下接触、释压帽等元件组成,



跌落式熔断器结构原理图

1—绝缘瓷瓶;2—接线端子;3—释压帽;4—上接触;5—熔丝管;6—下接触;7—熔丝元件

如图所示。它利用喷射气体灭弧。当开断故障电流时,熔丝管中的熔丝元件熔断,产生的高温电弧使管内衬套的刚纸管分解出大量去游离的气体,瞬间形成高的压力急速沿管口喷出,使电弧被拉长

和冷却,当电流过零时,电弧被熄灭。

根据熔丝管的结构

不同,灭弧方式有二端排气和逐级排气两种。熔丝管两端敞开的,为二端排气方式,对小故障电流(下限)开断能力较差;熔丝管顶端装有释压帽的,为逐级排气方式,开断小故障电流时,高压气流只从下端喷出,开断大故障电流(不超过上限)时,气体压力高,释压帽被顶开,气流从熔丝管两端喷出,有效地保证上、下限开断能力。熔丝管内安装的熔丝元件,除具有稳定的安秒特性外,还能承受足够的机械拉力,它是由熔体、铜尾线及其附件等组成的。熔体由银铜合金或低熔点金属材料制成。根据熔体熔断特性的不同,即在额定电流为 100 A 及以下时,熔体在 0.1 s 和 300 s 时熔断电流之比的不同,熔丝分为 K 型(快速,熔断电流比为 8~10)和 T 型(慢速,熔断电流比为 10~13)两种。

技术性能和应用 目前世界各国生产的跌落式熔断器的主要技术性能为:额定电压 3~110 kV,额定电流 50~300 A,额定短路开断电流 2.8~11.5 kA。中国生产的 RW10 和 RW11 型跌落式熔断器采用逐级排气灭弧方式,可以开断 6.3 kA 及以下的短路或过载电流。作为过电流保护装置,跌落式熔断器主要用于保

护配电变压器和架空配电线路的分支线路，还可以操作开断一定容量的变压器空载电流、一定长度的中压配电线路的充电电流或一定容量电容器组的电容电流。具体的开断能力根据产品的性能确定。

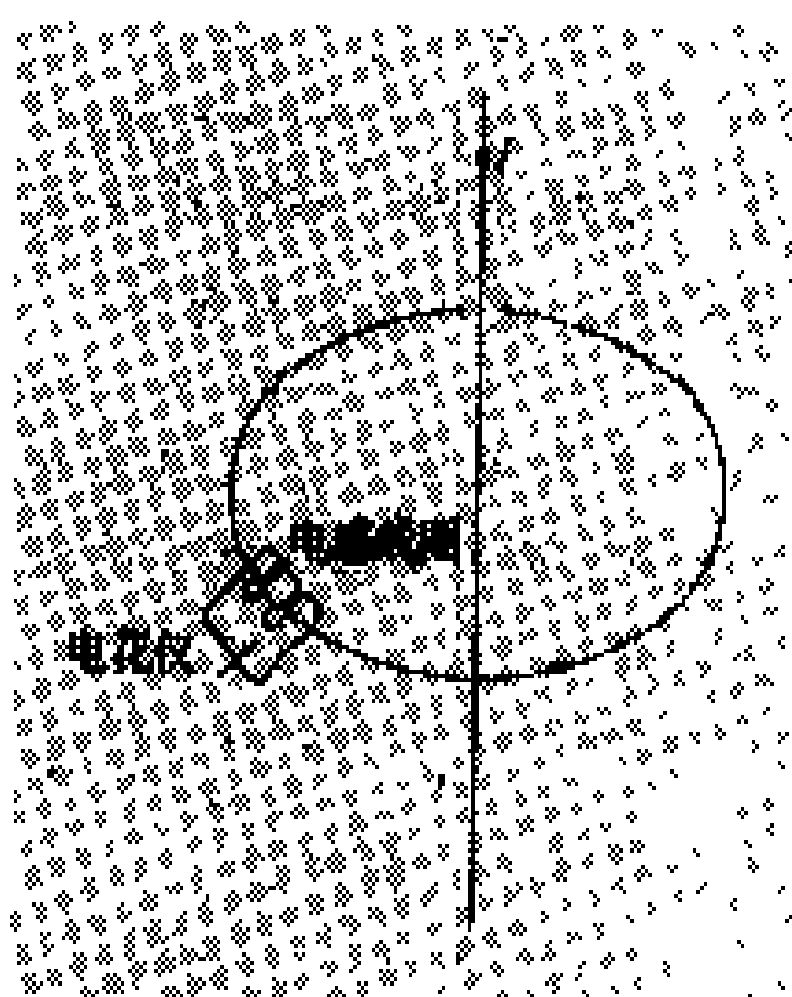
**发展简况** 跌落式熔断器结构简单，安装维修方便，价格低廉，但其开断能力有限，不能适合架空配电线路全线路各点短路容量差别很大的情况，因此不断地在改进。例如一种由限流熔丝和跌落式熔断器组合的熔断装置，由限流熔丝开断大的故障电流，而小的故障电流和过载电流则由跌落式熔断器开断，它的价格要比全开断容量的熔丝便宜。此外，对熔丝亦作了改进，例如波兰最近采用  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  和天然橡胶合成的消弧管，在管端部还增设了导电的气体缓冲室，改善了熔断器的上、下限开断特性。还有带避雷器的跌落式熔断器和可以不登杆操作的跌落式熔断器等。跌落式熔断器今后仍将在架空配电网中得到广泛的应用。

参见彩图插页第 27 页 83 图。

(唐剑秋)

douduyi

**陡度仪** (steepness meter) 由电花仪和电感线圈组成的用来测量雷电流最大陡度的仪器。用陡度仪测量流经载流导体(例如避雷针、避雷线)的雷电流陡度时，可将它放在载流导体的附近。电感线圈在载流导体磁场内感应的最大电压  $U = M (di/dt)_{\max}$ ，式中  $i$  为通过载流导体的雷电流， $M$  为电感线圈与载流导体间的互感。 $M$  的大小可由计算确定， $U$  的大小可由电花仪测定。雷电流的最大陡度  $(di/dt)_{\max}$  可根据  $M$  和  $U$  的值由上式求出。



用陡度仪测雷电流的最大陡度

(雷经煌)

duanluqi

**断路器** (circuit-breaker) 能承载、关合和开断运行线路的正常电流，也能在规定时间内承载、关合及开断规定的异常电流(如短路电流)的开关设备，是电力系统的保护和操作的重要电气装置。断路器的结构很多，型式各异，但基本上均由导电主回路、绝缘支撑件、灭弧室和操动机构几部分组成。

**基本结构** 包括：①导电主回路，通过动触头、静触头的接触与分离实现电路的接通与隔离；②灭弧室，

使电路分断过程中产生的电弧在密闭小室的高压力下于数十毫秒内快速熄灭，切断电路；③操动机构，通过若干机械环节使动触头按指定的方式和速度运动，实现电路的开断与关合；④绝缘支撑件，通过绝缘支柱实现对地的电气隔离。

**分类** 按灭弧介质和绝缘介质的不同，断路器可分为多油式、少油式、压缩空气式、磁吹式、真空式和六氟化硫式等。此外，在断路器的发展过程中还出现过水断路器。按照其他性质的不同，断路器又可分为：户内式和户外式，能自动重合闸与不能自动重合闸，手动、电磁、气动以及由液压或弹簧操动，能频繁操作与不能频繁操作。按照用途不同，断路器又可分为线路断路器(这是基本类型)，联络断路器，发电机断路器，矿用、船用和机车用的特制断路器等。按相数多少不同，断路器又可分为三相式和单相式。

**水断路器** 以蒸馏水作为灭弧介质和绝缘介质的断路器，其开断能力较小，介质容易变质，未能得到发展，适用电压限于 10~35 kV。

**多油断路器** 以变压器油或专用断路器油作为绝缘介质和灭弧介质的断路器。多油断路器的用油量随电压等级的升高而剧增，10kV 级的用油量为数十千克，220kV 级的用油量可达 40 余吨。多油断路器容易导致火灾，运输和检修不便，动作特性差。从 20 世纪 50 年代起就逐渐被淘汰。(见多油断路器)

**少油断路器** 仅用变压器油或专用断路器油作灭弧介质，对地绝缘采用支持瓷柱的断路器。少油断路器的用油量较油断路器的大为减少，10kV 级的用油量仅数千克，220kV 级的用油量也只有数百千克。但少油断路器的电寿命较短，在额定短路开断电流下的连续开断能力仅为数次。(见少油断路器)

**空气断路器** 以压缩空气作为灭弧介质和绝缘介质的断路器。空气断路器开断能力强，动作迅速，能适应低温地区的户外条件。但它的噪声大，零件多，加工复杂，造价高，可靠性较差。因此，空气断路器除在少数寒冷地区仍被使用外，在其他地区已逐渐被淘汰。(见空气断路器)

**磁吹断路器** 以开断电流自身形成的磁场协助灭弧的断路器。磁吹断路器的开断能力较小，额定电压较低，价格较贵，但电寿命长，只适用于要求频繁操作而又能免除火灾危险的地区。(见磁吹断路器)

**真空断路器** 利用电弧弧区压力在真空环境中扩散灭弧的断路器。真空断路器的电寿命长，适用于频繁操作，在额定短路开断电流下可连续开断数十次甚至近百次不需检修，但价格较贵，开断时产生较高的截流过电压，生产技术要求较高，额定电压和开断能力都不高。(见真空断路器)

六氟化硫断路器 以 SF<sub>6</sub> 气体作为灭弧介质或兼作绝缘介质的断路器。六氟化硫断路器有取代其他各类断路器的趋势,是当今断路器的主要发展方向。(见六氟化硫断路器)

历史及发展趋势 在1950年以前,电力系统中使用的断路器以多油断路器为主,其开断能力达20 kA,110 kV 级的多油断路器为双断口,后来多油断路器的电压等级发展至380 kV。在1965年以前,以少油断路器和空气断路器为主,其开断能力达26.5 kA,110 kV 级的为单断口,电压等级发展至500 kV。在1980年以前,以少油、空气、六氟化硫断路器为主,其开断能力达40~50 kA,220 kV 级的为单断口,电压等级达750~1200 kV。目前,六氟化硫断路器及其组合体——气体绝缘金属封闭电器(GIS)正在飞速发展中,其开断能力达63~80 kA,380~420 kV 级的为单断口,正在向500~525 kV 单断口六氟化硫断路器发展。中国已达到的水平是:220 kV 级的为单断口,开断能力达50

kA,电压等级达500 kV。为了适应电力系统稳定性的要求,断路器的开断时间已普遍缩短至40~60 ms,个别样品已达到20 ms。

参考书目

清华大学高压教研组编,高压断路器,北京:电力工业出版社,1980

(曹荣江)

duanluqi caodong jigou

断路器操动机构 (circuit breaker operating mechanism) 使断路器触头按指定操作顺序和方式实现接触与脱离的机构。包含动力、主动、传动、缓冲几个组成部分。操动力来自人力储能或电气储能,然后将其转变为电磁力、弹簧力、重锤力、气体或液体的压力等,以实现断路器的操作,由此形成手力操动式、电磁式、弹簧储能式、气动式以及液压式操动机构。各类操动机构的特性如表所示。

各类操动机构的特性

型 式	优 点	缺 点	备 注
手力操动式	结构简单,价廉,简便	出力小,就地操作时不利于人身安全,不能远方操作,不能自动操作	低压、小容量断路器用
弹簧储能式	要求的电源容量小,交、直流电源均可用,失电时仍能操作一次	结构较复杂,零部件加工精度要求高,操作功近千焦耳	是中小型断路器的发展方向
电磁式	结构简单,价廉	需要大功率直流电源,动作速度较低,材料消耗多,操作功数百焦耳	用于110 kV 及以下的断路器
气动式	不需要大功率直流电源,失电后仍能完成一定次数的操作	需要空气压缩机装置及空气压缩系统,检修、维护、运行均较麻烦,噪声大,操作功达数千焦耳	适用于110~220 kV 或更高电压等级的断路器
液压式	需要直流电源,失电后仍能操作一定次数,操作功大,动作快,操作平稳	加工精度要求高,价格较贵	适用于超高压大容量断路器

操动机构的功能 断路器操动机构能实现合闸、保持合闸、分闸、重合闸、合分、自由脱扣、防止跳跃、复位、缓冲和连锁等功能。

合闸 断路器操动机构实现合闸,应能克服额定短路关合电流峰值产生的电动阻力。在数十千安的关合电流下,电动阻力可达数千牛顿。合闸体系应保证在允许的最低电(液、气)压下能顺利关合到位;在允许的最高电(液、气)压下不致形成过大的冲击力而损坏元件。手力操动时采取储能方式而不直接合闸,更能保证人身安全。在合闸过程中又接到分闸信号时,断路器本身应能自动合闸到位,然后再开始分闸动作,以保证其额定开断能力。

保持合闸 合闸命令的持续时间是有限的,操作

功的释放时间也很短,因此,操动机构本身应在合闸到位后能自行保持在合闸位置。对液压操动机构要防止在运行中因失压而造成慢分闸。

分闸 分闸不仅能自动遥控和就地电控,还要能就地手动分闸。分闸动作的完成与下达分闸命令时间的长短无关。分闸要求尽量迅速、可靠,当接到分闸命令后,三相能一起动作,因非全相动作可能导致变压器中性点电压急剧升高而造成严重事故。

为了减少分闸信号的起动能,在操动机构中设有分闸省力机构。图1是一种常用的电磁式操动机构中的四连杆机构。合闸位置时,连杆1、2的中轴线并未处在同一条直线上,其间有一个很小的夹角 $\alpha$ 。因此,连杆2施加给连杆1的力被止钉所平衡,连杆2的位



置得以保持定位，轴Ⅲ也被定位，连杆3无法转动，连杆4也静止不动，整个体系处于平衡位置。一旦分闸电磁铁带电，连杆8上移，撞击轴Ⅰ，使上移超过连杆1、2的中轴连线，连杆1、2的位置上移，轴Ⅳ往右移，连杆3向逆时针方向转动，连杆4右移，轴Ⅳ从鞍形连杆7上滑落，连杆5落下，连接断路器的传动主轴Ⅰ也向逆时针方向旋转，断路器完成分闸动作。

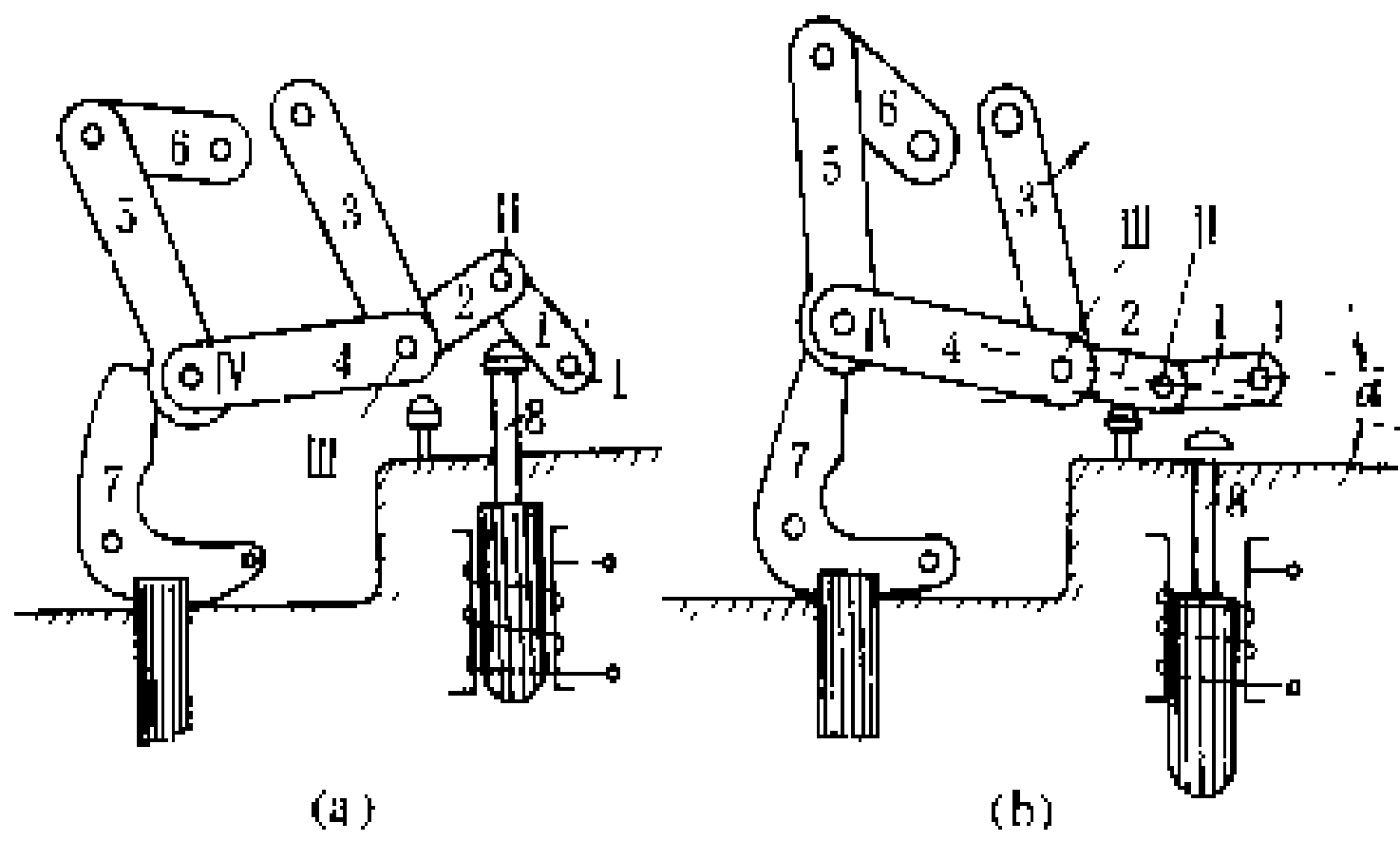


图1 一种四连杆结构的电磁式操动机构  
(a) 分闸过程中的位置；(b) 保持合闸位置  
1~7—连杆；8—分闸杆；1~Ⅳ—轴

此外，分（合）闸还需要有一套变直机械体系，它能使操作力形成的主轴旋转动作变换为动触头的直线运动。

**防止跳跃** 当断路器关合有预伏的短路故障电流时，不论操动机构有无自由脱扣体系，断路器都要求能自动分闸。此时，如合闸命令还未及时解除，则分闸后又将再度合闸，合后再分，合分不止，谓之跳跃。断路器发生跳跃时，触头将连续多次合、分短路电流，可能被严重烧伤，甚至因灭弧能力恶化，开断失败，致使断路器爆炸。因此，对所有自动控制的断路器均要求具有防止跳跃功能。防止跳跃的措施既可从机械系统得到保证（这样最好，但一般较困难），也可从电气控制回路中予以实现（这样比较容易，但可靠性较差）。

**缓冲** 动触头在高速分、合运动到位后要立即停下来，多余的动能靠缓冲器吸收，常用的分、合闸缓冲器有弹簧式、油式、橡皮和空气式等。

**连锁** 操动机构通常所具有的连锁功能是：分、合闸位置的相互连锁；低气（液）压与高气（液）压闭锁；弹簧操动机构中弹簧状态与分、合动作的闭锁；断路器与相应隔离开关位置和动作之间的连锁；断路器、隔离开关的操作与预定的安全措施、手段之间的连锁。防止跳跃、防止慢分也是一种连锁功能。

**气动式操动机构** 其基本结构是阀。因阀的结构不同，又有盘式阀和柱形阀之分。因阀的用途不同，又有起动阀、中间阀和工作阀之分。根据控制方式不同，又可将阀分为机械控制式和气动控制式。气动的作用方式又分为直接动作式、差动式和平衡式等。图2为一

种气动操动机构的原理图，其连杆部分与图1所示的电磁操动机构的相同，仅将图1中的合闸线圈与铁芯换成图2中的工作气缸与活塞，其余部分如图1所示。

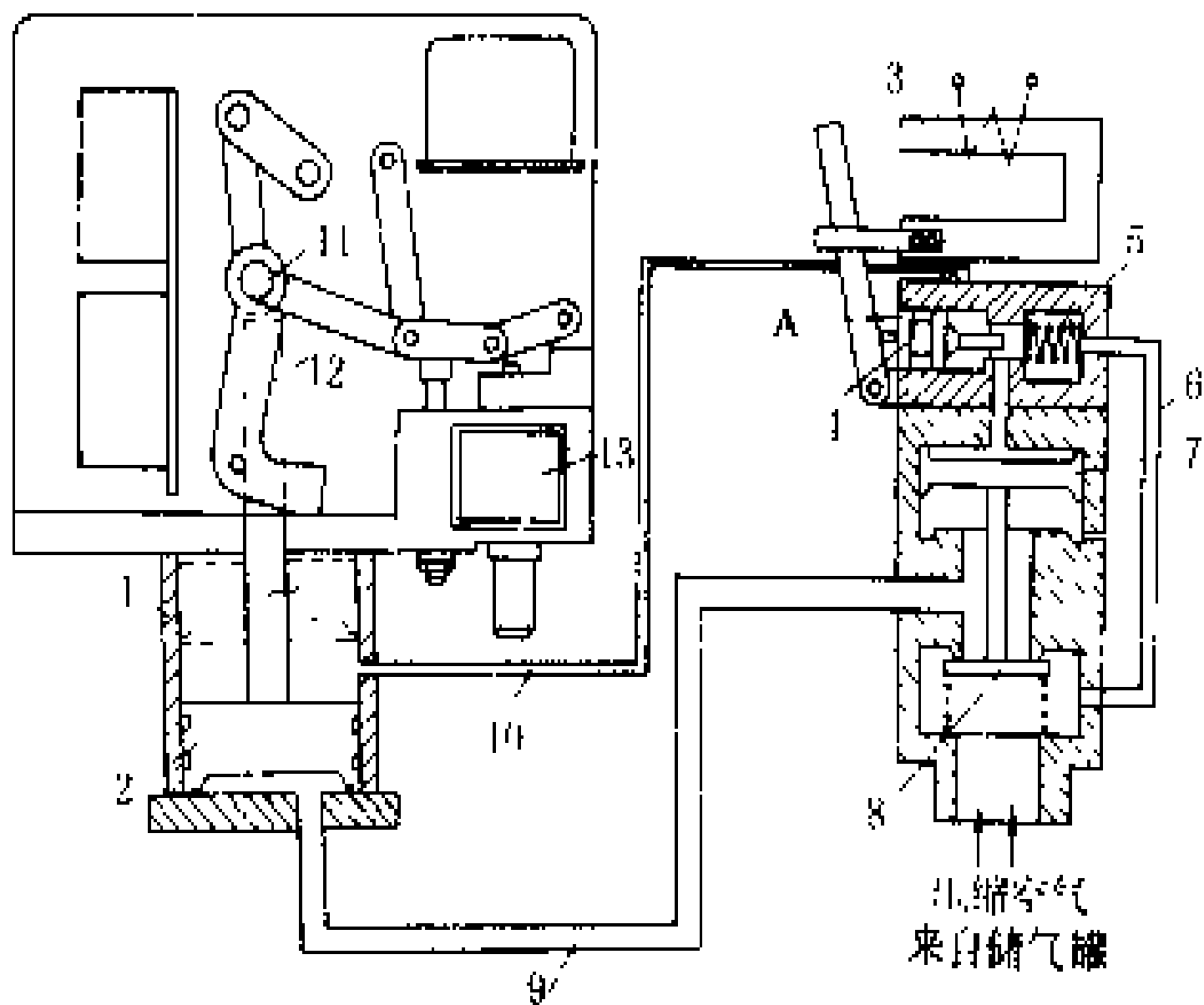


图2 气动操动机构原理图  
1—工作气缸；2—活塞；3—合闸电磁铁；4—顶杆；5—起动阀；6—管道；7—活塞；8—工作阀；9、10—管道；11—滚轮；12—鞍形连杆；13—分闸电磁铁

**液压式操动机构** 常用的液压式操动机构为储能式，操作力大，动作速度快。图3是一种简易型液压操动机构原理图，它采用差动式工作缸，由液体通过连杆混合传动。图中的机构处于分闸状态，主控阀5关闭，工作缸左侧接高压，右侧接低压，活塞维持在右边。

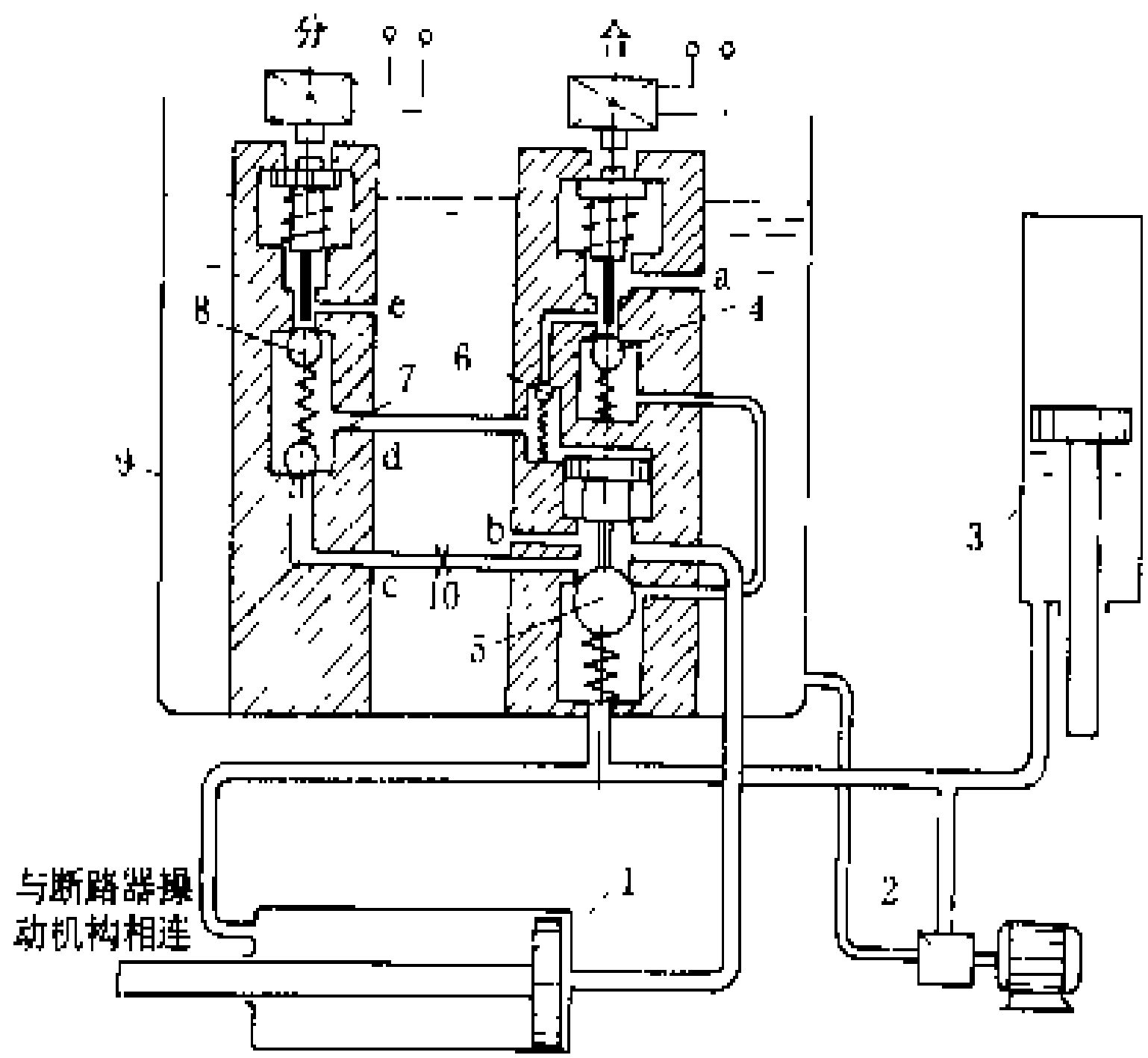


图3 液压操动机构原理图  
1—工作缸；2—油泵；3—储压器；4—合闸控制阀；5—主控阀；6、7—逆止阀；8—分闸控制阀；9—油箱；10—节流孔

**合闸过程** 合闸电磁铁受电后，合闸控制阀4动作，关闭了通向低压油箱的小孔a，打开阀4使高压油进入逆止阀6，使之开启。高压油经阀6分为两路：一路通向主控阀5的活塞上方，使活塞动作，顶开钢球，

同时关闭通向低压油箱的小孔 b，高压油经阀 5 进入工作缸 1 的右侧，推动活塞向左实现合闸；另一路高压油通过逆止阀 6 及管 d 进入分闸控制阀 8 使之闭锁。

当合闸电磁铁断电后，阀 4 及 6 关闭，主控阀 5 依靠节流孔 10、小管 c、逆止阀 7、小管 d 进来的高压油使其活塞及钢球维持在开启位置，工作缸及断路器维持在合闸状态。

**分闸过程** 分闸电磁铁受电后，打开分闸控制阀 8，主控阀 5 活塞上方的高压油经由小管 d 与孔 e 泄放，主控阀关闭。工作缸右侧高压油经小孔 b 流入油箱。此时，活塞左侧为高压油，活塞被推向右侧，实现分闸动作。

这种差动式工作缸机构存在着慢分的缺点。当机构处于合闸状态时，由于某种原因，油系统失压，主控阀 5 的活塞上方的维持油压也逐渐下降，致使主控阀 5 的钢球在弹簧作用下自动闭合。这时，工作缸两侧都没有高压油，断路器在合闸位置，于是油泵将自行启动增加油压。由于主控阀 5 关闭，高压油只能进入工作缸左侧，其活塞随着逐渐升高的油压而缓慢地实现分闸动作，这样，处于运行中的通流状态下的断路器将缓慢地分闸，灭弧室内的开断电弧形成长时间的炽燃状态，终将扩大为断路器爆炸事故。

#### 参考书目

清华大学高压教研组编．高压断路器 下册．北京：电力工业出版社，1980

(曹荣江)

duanluqi shiling baohu

**断路器失灵保护** (circuit breaker failure relay protection)

反应断路器拒绝跳闸的继电保护。用以缩短切除故障的时间和缩小停电范围，以利于电力系统的稳定运行。

在双母线接线或双母线分段接线中，断路器失灵保护起动后，跳开拒动断路器所在母线段上的其他全部断路器，以切除故障，使其他母线段得以继续运行。

在一个半断路器接线中，若母线侧断路器拒动，断路器失灵保护起动后，跳开所在母线上的其他全部断路器，以切除故障，此时仅切除了故障的线路。若一串中的中间断路器拒动，断路器失灵保护起动后跳开本串另一回线路的母线侧断路器，同时发送远方信号跳开故障线路对侧的断路器，以切除故障，此时多切除了本串中的另一回线路。

在多角形接线中，断路器失灵保护起动后，切除故障的范围与一个半断路器接线的相同。

断路器失灵保护由相应的故障线路保护或变压器保护起动，并经反应故障回路断路器动作状态的相电

流判别元件检定，在两者动作条件一致的情况下，经一定时限后跳开与故障回路相邻的所有断路器。断路器失灵保护的動作时限要大于断路器跳闸时间与保护装置返回时间之和。相电流判别元件的定值要保证在线路末端或变压器故障时保护能可靠动作。

此外，在双母线接线或双母线分段接线中，为了提高断路器失灵保护的動作可靠性，其出口跳闸回路由低电压元件或负序电压元件进行闭锁，电压元件的定值要保证在线路末端或变压器故障时保护能可靠动作，同时失灵保护要以尽可能短的时限先跳开母线联络断路器及母线分段断路器。

断路器失灵保护动作后要闭锁被跳开断路器的自动重合闸装置。

(胡俊侯)

duanluqi shiyan

**断路器试验** (circuit breaker tests)

根据有关技术标准，采用测试手段，对断路器的性能及质量状况进行的检验。由于现代科学对断路器的机电过程，特别是灭弧过程尚不能进行定量计算，因此，试验也是验证的唯一方法，对断路器的发展起着决定性的作用。

**断路器试验项目** 包括断路器导电主回路试验、绝缘结构试验、灭弧性能试验、操动特性试验以及对大气环境的适应能力试验等。

**导电主回路试验** 主要有动、热稳定试验，发热试验以及主回路直流电阻的校核。

**绝缘结构试验** ①按试验电压性质的不同，主要有：工频耐受电压试验，雷电冲击耐受电压试验，操作冲击耐受电压试验和截波试验，或由这些波形组合而成的复合试验；②按试验部位不同，主要有：主回路对地绝缘试验，相间绝缘试验，同相的断口之间（动、静触头之间）的绝缘试验；③按自然环境不同，主要有干燥、淋雨、污秽、雾和凝露、冰冻、湿热和高海拔等状况下的绝缘试验。

**灭弧性能试验** ①按短路故障形式不同，主要有：出线端短路故障试验，近区短路故障试验，失步操作试验，发展性故障试验，并联开断试验，异相同时接地故障试验，电容性电流试验（操作空载架空线路、空载电缆线路、并联电容器组等），小电感电流试验（操作空载变压器、并联电抗器、电动机等），变压器二次侧短路由其一次侧开断的试验；②按试验电流为额定短路开断电流的百分数不同（分别为 10%、30%、60% 和 100%），分别被命名为试验方式 1、2、3 和 4，还有在 2%~3% 和 4%~6% 额定短路开断电流下的临界电流操作试验以及电流中带有直流分量的试验方式 5；③按短路电流中直流分量的大小，又分为直流分量不

超过额定短路开断电流 20% 和大于 40% 的试验；④按被试断路器的完整性分为：三相试验，单相试验，部分断口试验和单断口试验；⑤按试验电流源和电压源的产生回路不同，分为直接试验和合成试验；⑥按操作顺序不同，分为：分、合、合分、分— $t$ —合分、分— $t$ —合分—180 s—合分、合分—15 s—合分、分—180 s—合分—180 s—合分等多种方式，其中  $t$  为重合闸无电流间歇时间（一般为 0.3~0.5 s）；⑦按连续开断能力不同，分为：额定电流下的连续开断能力试验，额定短路开断电流下的连续开断能力试验，若干类短路电流组合下的连续开断能力试验（也称为电寿命试验或累积开断电流试验）；⑧按燃弧时间的长短不同，分为：长燃弧时间、短燃弧时间和中燃弧时间下的开断试验；⑨按试验中动、静触头分离和接通瞬间的相位变化，分为不控制相位的三相或单相试验和可控制相位的试验。

**操动特性试验** 试验项目有：分、合闸时间，分、合闸平均速度和最大速度，刚分、刚合的速度，合分时间（即重合闸的金属短接时间），重合闸的无电流间歇时间，三相触头间、同相各断口间、同柱各断口间的分、合闸不同步性，行程和超行程（压缩行程）等的测定，机械操作试验，机械寿命试验（即机械稳定性试验），闭锁试验。

**其他试验** 主要有：耐受地震试验，高、低温试验，局部放电试验，防雨和水（油、气、六氟化硫）密封试验，噪声、无线电干扰电平和电晕测定，端子上的拉力试验，周围空气温度变化等环境条件的考验，可靠性检验，运输检验，以及试运行考核等。

**断路器试验类别** 根据产品定型投产、出厂、交接验收和运行维护的需要，通常区分为型式试验、出厂试验、交接验收试验、预防性试验等，并由有关技术标准和买卖合同具体规定各类试验的项目。

#### 参考书目

High Voltage Alternating Current Circuit - Breaker. IEC pub. 56, 1987

（曹荣江）

duanluqi xuanze

### 断路器选择 (circuit - breaker selection)

主要内容包括参数选择、性能选择和型式选择。

**参数选择** 包括正常负载参数、额定短路开断电流、全开断时间、开断空载线路充电电流。

**正常负载参数** ①额定电压和最高电压：国际电工委员会（IEC）只规定断路器的运行电压最高限值，即额定电压。在中国，额定电压指断路器运行中承受的电压的一般数值，在使用中断路器能承受的最高电压限值为这一额定值的 110%~115%。②额定频率：IEC

的专业标准为 50、60 Hz 通用。中国统一为 50 Hz，断路器均为 50 Hz 产品。③额定绝缘水平：中国的 6~63 kV 系统均为中性点不接地系统，其中 35~63 kV 级电器绝缘水平与 IEC 的规定相当。但中国的 6~10 kV 中性点不接地系统的绝缘水平是按有一相接地、另外两相的对地电压升为线电压的情况考虑的，超过了 IEC 的 6~10 kV 的绝缘水平。中国 10 kV 级的产品要求 1 min 工频耐受电压为 42 kV，冲击电压耐受水平为 75 kV 幅值。

**额定短路开断电流** 它是断路器最重要的运行基本参数，通常都是考虑在系统的最大运行方式、最高电压下的母线出线三相短路电流，不计衰减，还要考虑电力系统 15~20 年的发展规划所要求的数值。这里的短路电流是指系统的按次暂态电抗计算所得的数值。短路开断电流通常取断路器实际开断时间（继电保护动作时间与断路器固有分闸时间之和）后的短路电流周期分量作为校验条件。但随着大容量发电机组的增多，使短路电流中的非周期分量衰减时间延长，从而增加了非周期分量所占的比例，特别是采用了快速继电保护和快速断路器后，使开断电流中的非周期分量更加增大。这是在选择断路器开断电流时应注意的问题。

此外，三相断路器在开断短路故障时，由于三相动作的不同步，首相开断的断口触头间所承受的工频恢复电压将要增高，其增高值通常采用首相开断系数来表示。对电力网中各种经常发生的短路形式的分析结果表明，第一开断相的断口间工频恢复电压在中性点不接地系统中常为 1.5 倍相电压，而在中性点接地系统中常为 1.3 倍相电压。所以，在中性点直接接地或经小阻抗接地的系统中，通常是选用首相开断系数为 1.3 倍额定开断电流的断路器；而在 110 kV 及以下中性点不接地系统中，则通常选用首相开断系数为 1.5 倍额定开断电流的断路器。

**全开断时间** 断路器的全开断时间包括固有分闸时间、灭弧时间和继电保护动作时间。缩短断路器的全开断时间，是提高电力网运行稳定性的有效措施。对 110 kV 以上的电力网，由于稳定的要求需快速断开故障时，应选用固有分闸时间不大于 0.04 s 的断路器。500 kV 断路器的固有分闸时间要求缩短到 0.02 s，其全开断时间要求为 0.04 s。

**开断空载线路充电电流** 在 110 kV 及以下的电力网中，因为电气设备绝缘有一定的裕度，所以开断空载长线路充电电流不必对断路器提出特殊要求。而在 220~330 kV 电力网中，则需选用不重燃的断路器来限制开断空载长线路的过电压。在 330~500 kV 电力网中，还要考虑抑制三相重合闸和合闸过电压对断路器所提出的要求。中国标准对断路器开断空载线路充

电电流值的规定为:110 kV 时为 31.5 A;220 kV 时为 125 A;330 kV 时为 315 A。

**性能选择** 包括操作顺序、分合闸同期性、失步开断、并联开断、发展性故障开断、近区故障开断等内容。

**操作顺序** 断路器的开断能力需满足规定操作顺序的要求。断路器的操作顺序分为两种:①不用自动重合闸的断路器为“分—180s—合分—180s—合分”;②需要快速重合闸的断路器为“分—0.3s—合分—180s—合分”。其中 180s 为强行送电间隙时间,第一个“合分”表示第一次人为强行送电不成功或重合闸不成功,第二个“合分”表示第二次人为强行送电不成功或重合闸不成功后人为强行送电。

**分合闸同步性** 包括相间和同相各柱间的同步性。对电力网影响的关键在于三相分合闸的相间同步性。断路器的分合闸同步性,对继电保护动作时间的整定、操作过电压、断路器并联电阻热容量选择等都有影响。

对相间分闸不同步性,要求 110~220 kV 断路器分闸不同步性不大于 5 ms,对 330 kV 及以上断路器则不大于 3 ms。对相间合闸不同步性,则要求 110~220 kV 断路器合闸不同步性不大于 10 ms,对 330 kV 及以上断路器则不大于 5 ms。当对同步性未作特殊要求时,IEC 要求合闸时各触头接触瞬间的最大差异和分闸时各触头分离瞬间的最大差异不应超过额定频率的半个周期时间。

**失步开断** 变电所中的母线联络断路器或电力网之间联络用的断路器,有可能在电力网失步出现反相电压情况下进行操作,此时开断电流虽不大,但恢复电压很高,所以选用联络断路器时需考虑失步开断条件。IEC 和中国的标准要求:工频恢复电压对中性点直接接地系统应为额定电压的  $2.0/\sqrt{3}$  倍,对不直接接地系统为额定电压的  $2.5/\sqrt{3}$  倍,额定失步开断电流应为额定短路开断电流的 25%。

**并联开断** 在一个半断路器、多角形、双断路器和桥形电气主接线中,均有两台断路器同时断开一个故障的情况。超前动作的断路器因弧道电阻的存在而将大部分短路电流转移到滞后动作的断路器中。当超前动作的断路器中的小电流通过零值后承受很高的恢复电压,使电极再次击穿,电流又突然增加到 100%,此时断路器灭弧室将经受与发展性故障相似的考验,对少油断路器和单压式六氟化硫断路器应满足这种并联开断的性能要求。

**发展性故障开断** 当断路器断开故障灭弧过程中,接着又发展成另一种故障,使燃弧过程延续发展,将致使断路器开断失败。因此,对 35kV 及以上的断

路器,需进行发展性故障开断试验并应满足开断要求。

**近区故障开断** 近区故障是距断路器数百米至数公里处发生的故障,其特点是恢复电压上升陡度急剧增大,使断路器开断困难。IEC 要求额定电压为 52kV 及以上、额定开断电流超过 12.5 kA 且直接与架空线路相连的断路器,均需进行近区故障开断试验。

**型式选择** 中国目前生产少油、多油、空气、六氟化硫、真空、电磁等不同型式的断路器。选择断路器型式时需根据使用环境条件、正常和故障工况下的技术要求、操作对象和过电压要求等确定。

110~330 kV 变电所中,如无特殊要求,通常是选用少油断路器,以取得其经济性。只有当技术性能不能满足要求时,才选用六氟化硫断路器。在 500 kV 变电所中,需选用断流能力强、维护工作量少、结构简单和可靠性高的六氟化硫断路器。在 35 kV 变电所中,当技术条件能够满足要求时,通常是尽量选用价格低并带套管式电流互感器的多油断路器或少油断路器。在技术经济条件允许时,下列场所中的 110 kV 及以上配电装置可以采用气体绝缘金属封闭电器(GIS):①城市市区内或场地狭窄的变电所;②地下变电所;③重污秽和地震烈度高的地区的变电所。对于需要频繁操作的回路,应选用可频繁操作的断路器。用以投切电容器组的断路器,可以选用真空断路器或六氟化硫断路器。

**发展趋势** 很多发达国家经历了使用少油和空气断路器阶段后,现已全部进入发展六氟化硫断路器阶段。敞开式六氟化硫断路器的技术水平,目前已经达到 765 kV、63~80 kA、2 个工频周期的水平,且规格齐全,检修周期长,甚至可以不需检修。全封闭组合电器于 1966 年在 220 kV 电压等级投入运行后,又在 345、380、500、765 kV 电压等级相继使用,以解决污秽地区或大城市负荷中心的供电问题。目前中国生产的六氟化硫断路器的技术水平为 500 kV、50 kA、2.5 个工频周期。见断路器。

参考书目

曹荣江.交流高压断路器的运行条件.北京:水利电力出版社,1982

(叶景星)

◆

duanxian xiezhen guodianya

**断线谐振过电压** (resonance overvoltage due to broken lines) 电力系统中由于导线断落而激发起来的铁磁谐振过电压。

图示为中性点不接地系统中单相断线和一侧导线落地所形成的典型谐振回路,其中  $E_A$ 、 $E_B$  和  $E_C$  为电源变压器的对称电动势, $L_k$  为空载变压器的励磁电感, $C_0$  和  $C_{12}$  为导线的对地和相间电容。按照戴维南定理,

可将此图等效变换为最简单的串联电路。图中 $L=1.5L_K$ ,  $E=E_0 \frac{C_0}{C}$ ,  $C=C_0+2C_{12}$ 。两相断线时亦可变换为类似的等效电路。由于 $L$ 为铁芯电感, 故在不同 $C$ 值(即不同导线长度)下可能发生高频、工频和分频铁磁谐振, 并在断线处和负载变压器端部产生铁磁谐振过电压。在工频谐振时, 主回路呈容性,  $\dot{U}_L$ 与电源电动势反相, 负荷变压器三相电压的相序会与断线前相反, 称为相序翻转。此时负荷变压器二次侧如果接有小容量的电动机, 将会发生反转。但当负荷变压器二次侧的有功负荷较大时, 其等效电阻可以吸收足够的振荡能量而使谐振强度受到抑制。

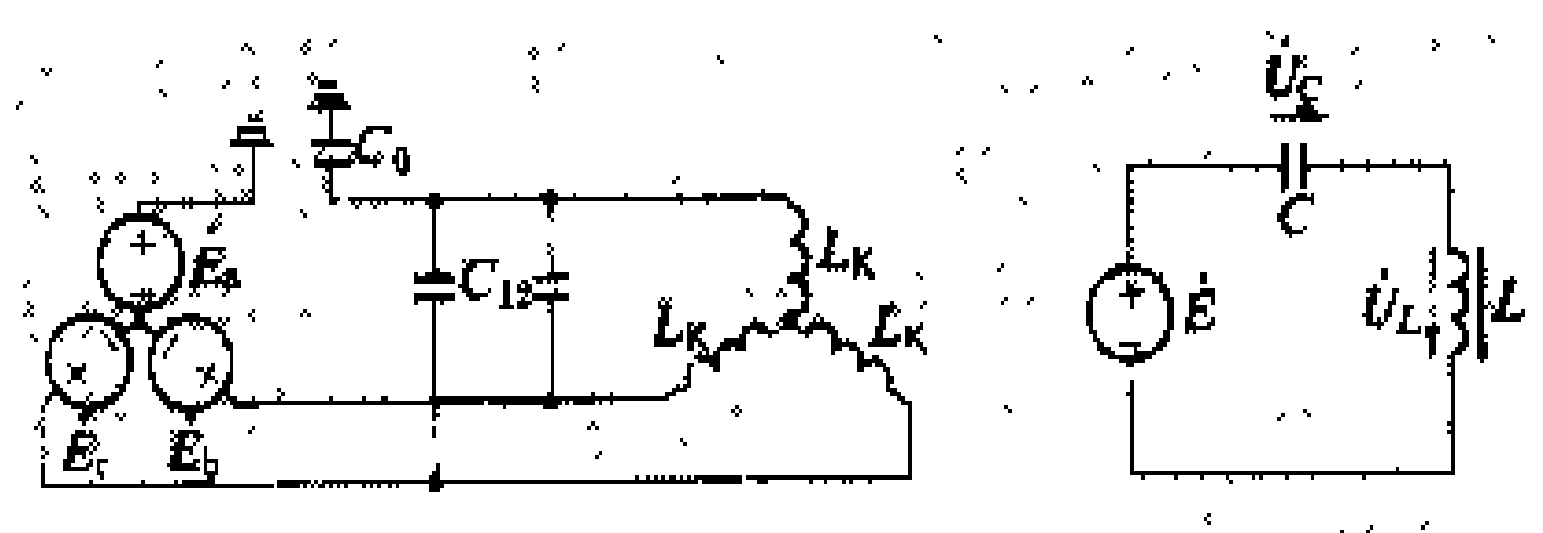


图1 A相断线接线图及其等效电路

断线谐振亦可在消弧线圈补偿电力系统和110~220 kV的中性点有效接地的电力系统中产生, 后者是由于部分负载变压器的中性点不接地而形成断线谐振回路。

断线谐振过电压引起的绝缘事故在配电网中较常发生, 如引起配电变压器的闪络和避雷器爆炸事故等。主要的防止措施是加强线路维护, 避免发生断线, 一旦发生断线事故, 则尽快切除负载变压器。

(陈维贤)

duoduan zhiliu shudian xitong

## 多端直流输电系统 (multi-terminal DC transmission system)

由三个或以上换流站及其连接的高压直流线路所构成直流输电系统的总称。它是两端直流输电系统的发展形式。多端直流输电系统可以实现各换流站交流端所连接的交流电力系统之间的功率输送或电力交换。与达到同样工程目的而采用多条两端直流输电方案相比, 采用多端直流输电往往更为经济。

用途 主要有: ①用于直流输电主下线送端的多电源汇集系统和受端的多个负荷点的分配系统, 如正在建设的魁北克—新英格兰直流互联系统; ②用于从直流输电线路中途支接出来以供沿线难于由交流电力系统供电的小负荷, 如已建好投运的撒丁岛—科西嘉岛—意大利本土的三端直流输电系统; ③补充增强交流电力系统的网架, 如拟议中的美国西南部的七端高压直流电力网络; ④为了分期投资和节省电能损耗, 有

的换流站可先建一套换流设备, 以后需要时可在站中再扩建一套, 与先建的并联以增加换流站的总容量, 其实质也是多端直流输电的一种特例。

系统构成的型式 按直流电力网络接线可成分支和闭环两大类型。

按换流站接入直流线路方式可分成并联和串联两种。由此组合成的基本型式有: ①换流站以并联方式接入分支型直流电力网, 简称为站并联—网分支型(见图1);

②站并联—网闭环型(见图2); ③站串联—网闭环型(见图3)。

此外, 由这三种基本型式还可以构成其他混合型的多端直流输电系统。图中均以单极系统为例。

运行特点 站并联—网分支型的特点是各换流站

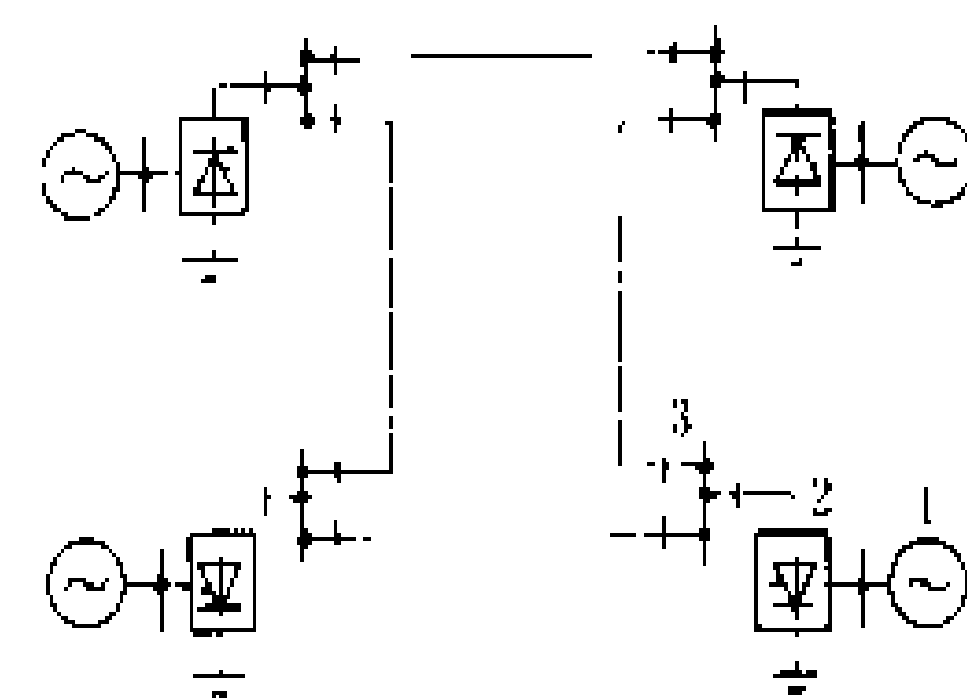


图2 站并联—网闭环型的多端直流输电单极系统  
1—交流电力系统; 2—换流站; 3—直流断路器或高速自动隔离开关

均在一个基本相同的直流电压下运行, 换流站间有功功率的分配和调整主要通过改变换流站的直流电流值来实现。当其中某一换流站需要改变潮流方向, 即将原运行于整流(或逆变)状态改变为逆变(或整流)状态, 必须将该换流器直流侧两个端子的接线颠倒过来, 再重新接入直流网络, 方能实现。

因此, 这种构成型式对潮流变化频繁的系统是不方便的。当系统中某部分发生持续性故障, 用能切断故障电流的直流断路器切除故障是较为简便的。直流断路器的研制取得不小的进展, 但尚待进一步的实用化。在无直流断路器的情况下, 可借助于换流器的控制系统使故障点电流降为零而灭弧, 随之用高速自动隔离开关将故障断开并与系统中健全部分隔离, 然后将健全部分自动

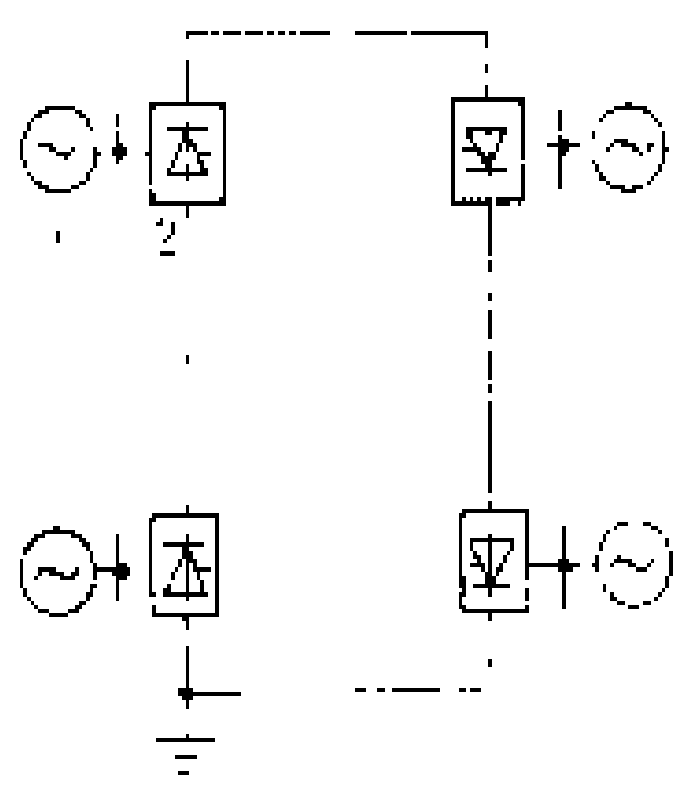


图3 站串联—网闭环型的多端直流输电单极系统  
1—交流电力系统; 2—换流站



再起动恢复运行。

站并联—网闭环型在某段直流线路发生持续性故障时,切除故障段后仍能维持各换流站的运行。因此,环形直流电力网络的供电可靠性比分支型高。

站串联—网闭环型中的全部换流站通过直流电力网各段线路串联构成环形,各换流器以同一直流电流运行。各换流站间的有功功率调节和分配主要靠改变各换流站的直流电压来实现,并由其中一个换流站承担整个串联电路中直流电压的平衡,同时也起调节闭环中的直流电流的作用。当换流站需改变潮流方向时,仅需改变换流器的触发相位将原来的整流(或逆变)改为逆变(或整流)运行,无需颠倒换流器直流侧的两个端子接线,潮流反转的操作比较方便。在某换流站发生故障时,可投入故障换流站的旁路开关,使其退出运行,其余健全的换流站仍可继续运行。在直流线路发生非永久性故障时,可将全系统直流电压控制到零,故障自动消除,然后重新自动再起动,投入运行。在直流线路发生永久性故障时,则整个系统就不能再继续运行。为避免全网停电,必要时可采用双回路的站串联—网闭环型式的系统。

多端直流输电控制的原理和方法见多端直流输电系统控制。

#### 参考书目

浙江大学发电教研室直流输电教研组,直流输电,新一版,北京:水利电力出版社,1985

(王继桦)

duoduan zhiliu shudian xitong kongzhi

### 多端直流输电系统控制 (multiterminal DC transmission system control)

保证多端直流输电系统可靠、稳定地运行,并实现所要求的功能而采用的控制技术。其原则与二端直流输电系统的控制相同,也是由以各端换流器分别控制为基础的基本控制和协调各端及两极运行的主控制构成(见直流输电系统控制、直流输电控制方式)。在多端直流输电系统中,以换流站对直流电力网连接方式而言,也有并联连接和串联连接两种类型,其控制方法各有不同的特点。

**并联多端直流输电系统的基本控制** 控制原则是由一端换流站控制直流电压,其他各端分别控制各自的直流电流。控制方法主要有:电流裕额法、限制电压法和电压裕额法等。

**电流裕额法** 换流站以并联方式接入直流电网的多端直流输电系统与二端直流输电相同,各端换流器控制特性都可由三段特性组成:一段定直流电流特性,一段定直流电压特性和一段最小触发角限制特性或定关断越前(或裕度)角特性。以不包含定直流电压特性

者为例,在正常运行时,其中必有一个换流站承担控制直流电压的责任,如果它是整流站则运行于最小触发角限制特性,如果它是逆变站则运行于定关断裕度角特性。其余各换流站都运行于定直流电流特性。

电流裕额法的优点是各端换流器运行于较高的直流电压,因而消耗的无功功率较小,所需装设的无功补偿设备的容量较小。不足之处有:①某一换流站交流电压发生快速且幅度较大的变化时,直流电压也跟随着发生变化,导致各端的功率都发生变化;②控制电压换流站的直流电流快速改变时,直流电压也将发生显著的变化,这是由于定触发角或定关断裕度角特性是斜线的缘故;③当改变某些站的电流整定值时,各站的操作人员要通过电话联系协调地进行操作,避免实际电流裕额小于给定值,甚至无法正常运行;④当需要快速控制,特别是某一端因故障退出运行后要求系统快速恢复运行时,就必须借助于整定值的集中调整平衡和快速可靠的通信系统的传递。

**限制电压法** 各换流站均增设直流电压控制,使特性具有定电压部分。正常时,由一个换流站(假设为整流站)将直流电压控制为额定值 $U_{dN}$ ,其他各站控制各自的电流。由于整流站设有最大电压 $1.05 U_{dN}$ 的限制,而逆变站设有最小电压 $0.95 U_{dN}$ 的限制,故在各种情况下直流电压的偏移不超过 $\pm 5\%$ 。如果由于整定误差等原因,会出现电流整定值不平衡。当所有整流站的整定值总和大于全部逆变站的总和时,整流站将转入 $1.05 U_{dN}$ 定直流电压控制;反之,逆变站将转入 $0.95 U_{dN}$ 定直流电压控制。使系统仍具有稳定的运行点,因而减轻了对通信系统的依赖。这一方法的主要缺点是:当某逆变站交流电压突然下降到下限以下时,该站将承受全部直流电流以致严重过载,而其他逆变站将变成空载,要采取附加措施加以防止。

**电压裕额法** 所有换流站都具有一段定电流和一段定电压特性。电压控制端的电压整定值为 $U_{dN}$ ,所有电流控制端的电压整定值均增大一个电压裕额。这一方法能限制直流电压的最大值,但仍要依靠电流整定值的集中平衡和信息快速可靠的传递。另外,正常运行时,为保持有定直流电压特性,各换流器的触发角或关断角比其他方法的大,因此无功功率的消耗和阀阻尼回路的损耗均较大,这在经济上是不利的。

**并联多端直流输电系统的主控制** 各级主控制的主要任务包括电流整定值平衡、功率控制、功率调制控制和起停控制等。功率整定值平衡和控制单元能限制和协调各功率整定值的变化速度,以防止各端交流系统受到功率变化过快的扰动。附加的功率调制作用与二端系统的相同,只是更复杂一些。

并联多端直流输电系统的控制在不同程度上要依

靠远程通信系统。如何减轻对通信系统的依赖,如何在信道故障时仍能保持主要的控制功能,以及在采用电流裕额法的系统中某一换流站或某段直流线路因故障退出运行而且通信系统也同时失效的情况下,如何快速恢复运行等等,都是需要继续研究的课题。

**串联多端直流输电系统的控制** 主控制的基本任务是根据各端功率要求,以线路损耗最小为原则,确定最佳电流整定值和各端电压整定值。由于所有换流站的直流电流是共同的,所以基本控制的原则是由一个换流站控制电流,其余各站控制各自的直流电压。为了减小无功功率损耗,可以使控制电压的换流器工作于最小触发角或最小关断角特性,并利用换流变压器分接开关的切换控制直流电压,只是控制不连续且速度很慢。系统的功率可以由控制电压的换流站通过改变直流电压值就地进行控制。在所有换流站都不满载时,则应减小直流电流,以尽量降低线路的功率损耗,这就要依靠集中的主控制。主控制的其他任务和对通信系统的依赖程度与二端直流系统相似。

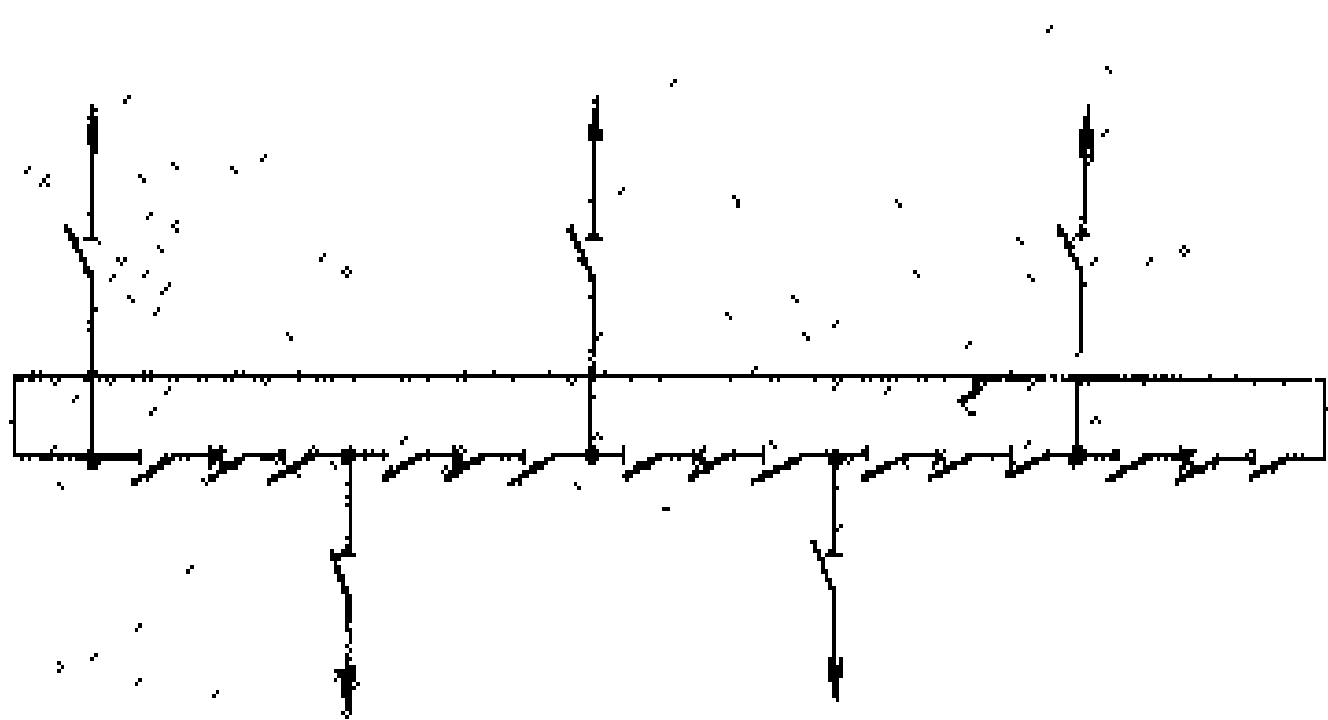
参考书目

浙江大学发电教研室直流输电科研组,直流输电,新一版,北京:水利电力出版社,1985

(吴国炎)

duojiaoxing jiaoxian

**多角形接线** (ring bus configuration) 将多台断路器环形相连并从每两台断路器连线上引出回路的电气主接线。当有三台断路器环形连接时,从每两台断路器之间可以引出三个回路,即成为三角形接线。其他多角形接线按此类推。多角形接线中每台断路器的两侧均装设有隔离开关,供检修断路器时隔离之用。见图。



多角形接线

多角形接线的断路器台数与所引出的线路回路数相等,与单母线接线相同,是一种较为经济的接线。在单母线接线中,当母线、母线隔离开关发生故障、进行检修,或当继电保护动作而断路器拒绝动作时,都会使整个配电装置停电。而在多角形接线中,最严重的故障也只会使相邻的两回线路停电,所以多角形接线的供电可靠性较高。多角形接线中任一断路器进行检修

时,其他各回路均能继续正常供电,具有较高的灵活性。此外,多角形接线的配电装置占地也较少。为了提高多角形接线的可靠性,电源线路和供电线路通常需布置在对角上,避免相邻布置。

当断路器进行检修时,多角形接线可开环运行,开环运行的时间将随着断路器台数的增加而增加。多角形接线一般不多于六角形,通常为三角形和四角形。多角形接线的配电装置在布置上不容易进行扩建。

采用多角形接线一般是在变电所的远景规模比较明确时和场地受到限制。

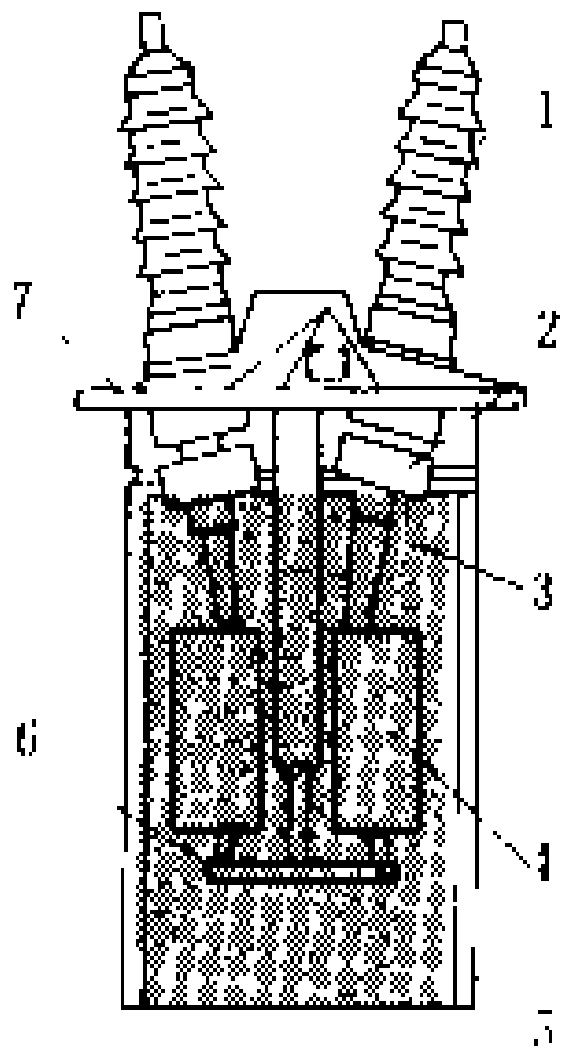
(尤国铭)

duoyou duanluai

**多油断路器** (bulk-oil circuit breaker)

利用变压器油或断路器专用油作为绝缘和灭弧介质的断路器。其导电主回路和灭弧元件置于一充满变压器油或专用油的接地箱壳中,箱体一般呈圆柱形或椭圆柱形,用油量很大,如10kV级的多油断路器用油数十千克,220kV级的需用油40余吨。为了省油,20世纪50年代曾发展过表壳形的多油断路器,但很快被迅速发展的少油断路器所取代。多油断路器的结构原理如图所示。

多油断路器有简单开断和加装灭弧室两种灭弧方式,它们都属于非密闭容器中的压力过程。首先,在出现强电流电弧瞬间,由于液体的不可压缩性和惰性,灭弧区域立即产生很高的压力波,并以约1000m/s的速度向外传播,机械性破坏作用很大。随后,大量的电弧热能使油分解,形成以H<sub>2</sub>(占70%)、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(占25%)及甲烷、乙烯等其他气体(占5%)组成的可燃性混合气体。H<sub>2</sub>是优良的散热介质,能有效地从弧区带走大量热能,并能在电弧熄灭后立即在弧区建立起很高的介电强度,使弧区失去导电能力,使电路处于断开状态。按照灭弧气流流向相对于弧柱纵向的位置关系,灭弧室分为纵吹式、横吹式和纵横吹式三种,其中以横吹灭弧室的开断能力最强。



多油断路器结构原理图

1—绝缘套管;2—电流互感器;3—变压器油;4—静触头和灭弧室;5—油箱;6—横梁(动触头);7—箱盖

变压器油或专用断路器油虽然是优良的灭弧、传热和绝缘介质,在电弧作用下的分解物无毒,但如果开断失败,电弧的高温会使触头铜材汽化。铜蒸汽具有很大的毒性。又因油量很大,不论安装在屋内或屋外,都

潜藏着巨大的火灾危险。另外，多油断路器体积庞大，运输和检修不便，占地面积大，材料消耗多，无法采用积木式结构提高其特性参数，例如，开断能力达到 40 kA (300 kV 时) 后的各项经济指标已难于与其他型类的断路器竞争。因此，多油断路器终于被淘汰。但是，多油断路器在中国的 35~63 kV 级的配电网中仍居主导地位，这是因为它制造简易，不要求特殊的工艺和材

料。在世界上，多油断路器曾作到 345 kV，额定电流达 2000 A，额定短路开断电流达 38.5 kA。  
多油断路器常配用电磁式操动机构，合闸时要求配有很强的直流电源，因而必须配置相当规模的蓄电池组。

(曹荣江)



fashi bileiqi

**阀式避雷器** (valve type surge arrester)

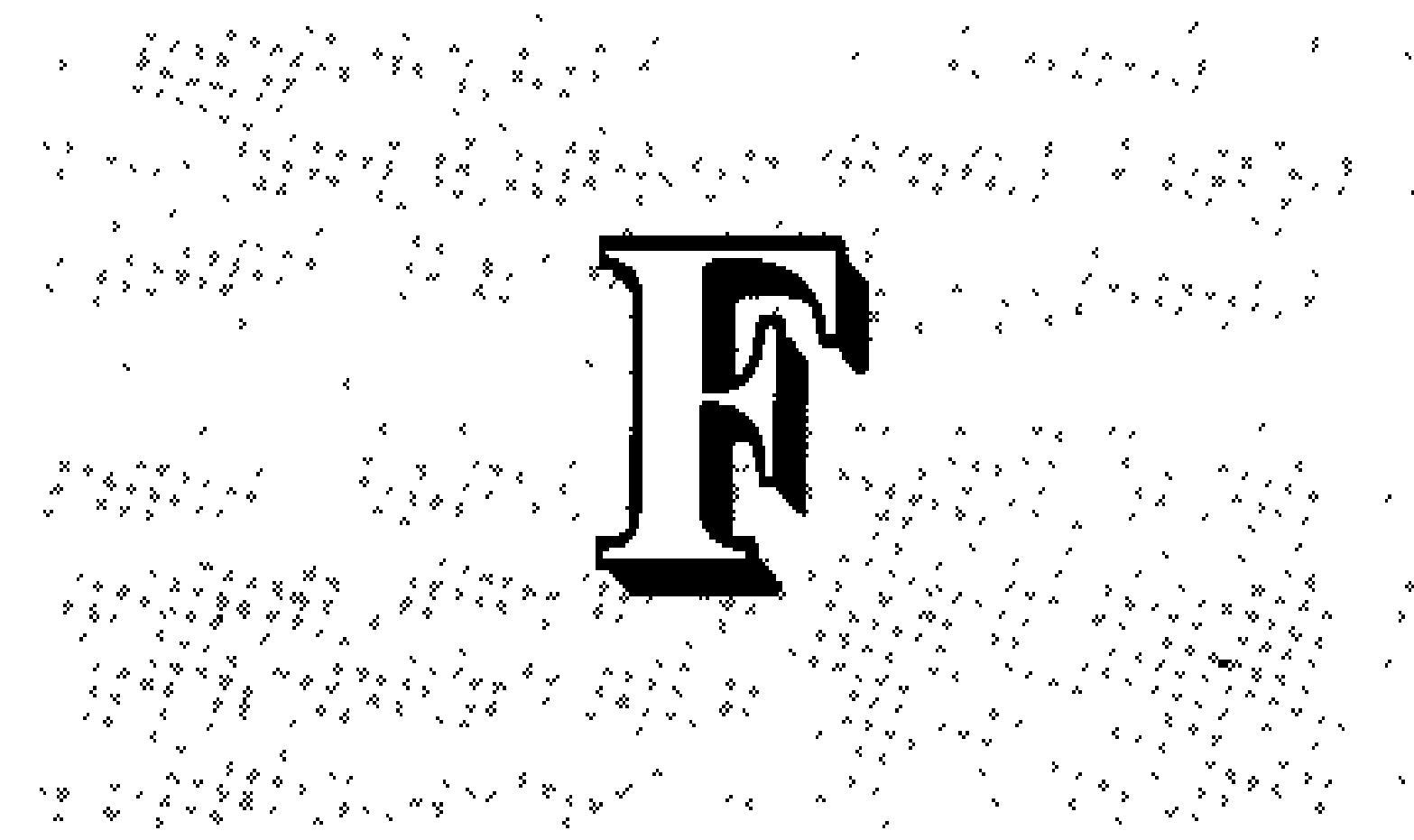
含有阀片的避雷器。阀式避雷器可分为有间隙和无间隙两种,包括普通阀式避雷器、磁吹避雷器、金属氧化物避雷器和复合避雷器。

阀片实际上是一种非线性工作电阻片,其伏安特性通常表示为  $U=CI^\alpha$ 。式中  $I$  为流过阀片的电流,A; $U$  为电流在阀片上的压降,V; $C$  为阀片流过 1A 电流时的压降,其值与阀片的材料及尺寸有关; $\alpha$  为非线性系数,其值小于 1。阀片电阻的非线性使阀片在低电压下具有较高的电阻值,在高电压下具有较低的电阻值。 $\alpha$  愈小,阀片的非线性效果愈显著。常用的阀片材料有碳化硅与氧化锌两种。碳化硅阀片的非线性系数在 0.2 左右,氧化锌阀片的非线性系数可小至 0.01~0.04。

以氧化锌阀片为非线性电阻元件组成的避雷器称氧化锌避雷器或金属氧化物避雷器。氧化锌阀片优越的非线性特性,使其在正常工作电压下只流过微安级的电流(此时可以认为阀片不导通)。在过电压出现时,阀片的电阻会自动变小,使电路导通,起到释放过电压能量的作用。在过电压能量释放后,阀片的电阻又会自动变大,恢复不导通状态。氧化锌避雷器可以不串联放电间隙。以碳化硅阀片为非线性电阻元件组成的避雷器称碳化硅避雷器。由于碳化硅阀片的非线性特性不够理想,必须加串联的放电间隙来隔离正常工作电压。当过电压的幅值达到间隙的放电电压时,间隙放电,释放过电压能量。过电压能量释放后,在工频电压的作用下,碳化硅阀片中仍流过数十至数百安培的工频电流(又称续流),再依靠放电间隙切断工频续流,使避雷器恢复不导通状态。碳化硅避雷器所用的放电间隙有普通间隙和磁吹间隙两种。普通间隙靠短间隙阴极近极效应切断工频续流,使用普通间隙的避雷器称为普通阀式避雷器。磁吹间隙靠磁场力吹弧来切断工频续流,使用磁吹间隙的避雷器称为磁吹阀式避雷器或磁吹避雷器。

阀式避雷器的阀片和放电间隙一般装在瓷套内。为了防止内部元件受潮,瓷套两端必须用橡胶圈或其他方式密封。110kV 及以上的阀式避雷器一般还装有防爆装置,以防止避雷器动作后不能熄灭电弧而引起的瓷套爆炸。当避雷器由数节瓷套叠成或瓷套比较高时,应在避雷器顶部加均压装置。对用在额定电压为 35kV 及以上电力系统中的阀式避雷器,需在避雷器下方串接放电记录器,记录避雷器的放电次数。图示为阀式避雷器的外形结构。

阀式避雷器动作时所能承受的最大工频电压有效值称为阀式避雷器的额定电压,其放电间隙应能在该额定电压作用下切断工频续流。避雷器的额定电压也



fadianliu duandian jiance zhuangzhi

**阀电流断点检测装置** (detector of valve current interruption instant)

用于检测换流阀电流过零时刻信号的转换装置。其输出信号用于实测换流阀的关断角和实测型定关断角控制(见直流输电控制方式)。有电磁型和高电位采样光传输型两类。

电磁型阀电流断点检测装置的阀电流通过与换流阀串联的电流微分变压器一次侧,其二次侧绕组输出与被测的阀电流微分值成正比的电压信号。换流阀导通期间,阀电流实际波形的上升沿、下降沿,以至于近似平顶部分都不是恒定不变的,因而微分变压器的二次侧绕组有不少不同脉宽和不同幅值的脉冲信号输出。但在阀导通期首、尾两端各有一段与换相期间相应的相位间隔,在此间隔内有一脉宽等于换相角、幅值较大的换相期信号输出。同时,可用积分器把阀电流微分信号还原为阀电流信号。经处理后得到阀电流关断脉冲和换流阀导通区。这种检测装置的测量误差较小,在 20 世纪 70 年代初,已有国家在实验室中应用。中国上海 31kV 直流输电试验线路,曾成功地把电磁型阀电流断点检测装置应用于该线路的控制系统中。舟山直流输电工程中,又进一步作了研究改进,采用了自动校零等处理电路,提高了装置的工作稳定性和检测精度。

光传输型阀电流断点检测装置是直接接在换流阀的高电位上,将换流阀中每一个晶闸管元件的电压从正向压降(或视作为零)跃变为负的时刻转换为关断信号,并通过光缆传送到处于地电位的电子设备中。当测得有 80% 的晶闸管元件已关断时,则输出该换流阀电流的断点信号。光传输型阀电流断点检测装置具有很好的抗电磁干扰性能和检测精度,已广泛应用于高压直流输电工程中。

国外某些直流输电工程不检测阀电流的断点,而是用计算机计算,并在显示屏上用数字显示出实际的关断角数值。

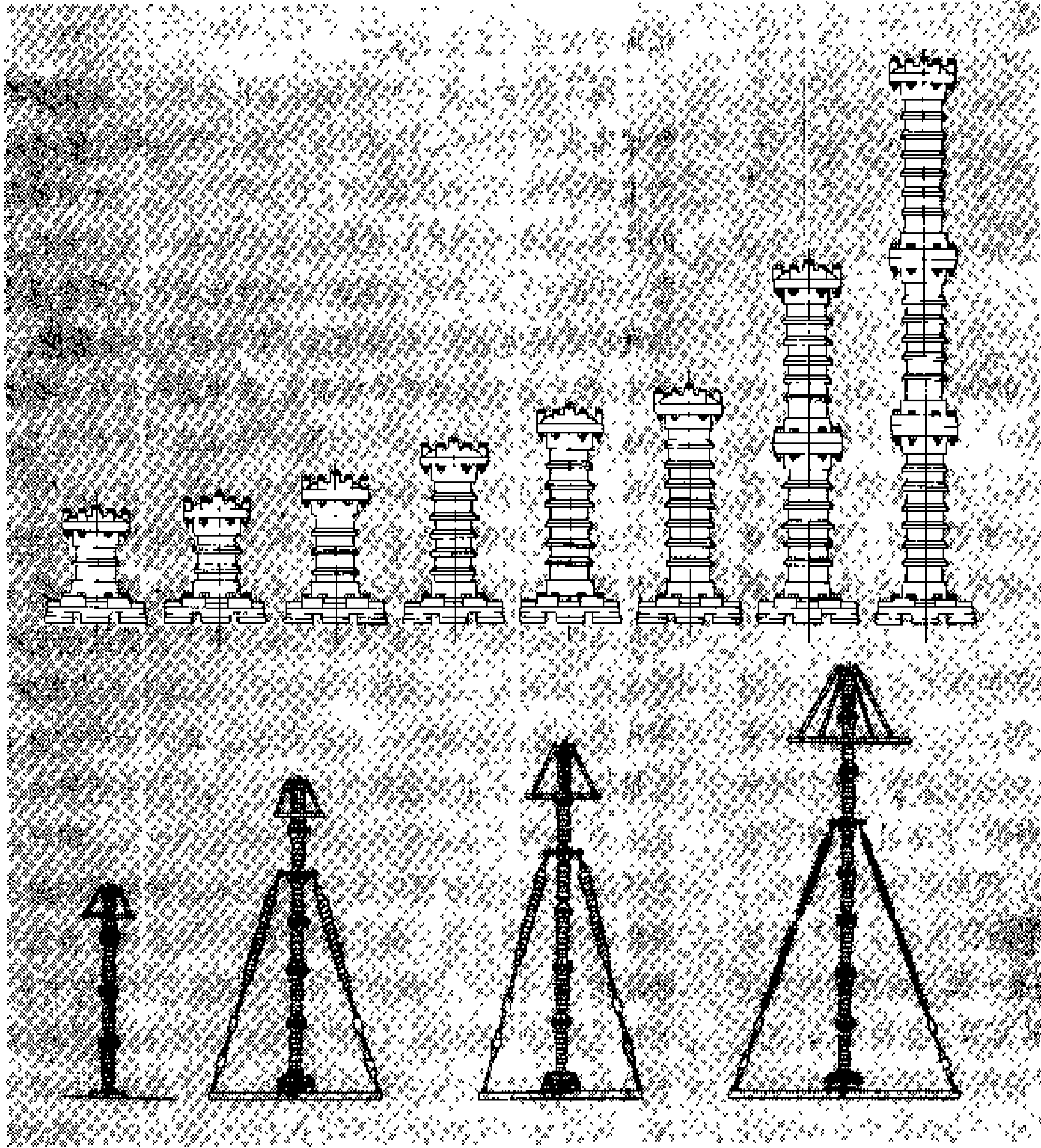
(王传佑)

曾称为灭弧电压。雷电冲击(或操作冲击)电流通过阀式避雷器时,避雷器所呈现的压降称为雷电冲击残压(或操作冲击残压),它是表征阀式避雷器保护特性的

fating  
**阀厅** (valve hall) 安装换流阀的建筑物。它是换流站中的主要建筑。阀厅布置以极为单位,一个阀厅布置一极的工作阀和备用

阀,及其相应的触发装置、避雷器、冷却设备、空调装置等。如图所示为装有三台座装式四重阀的阀厅布置示意图。对阀厅建筑结构有体积较大、密闭性要好、能屏蔽阀厅内设备运行时产生的对外无线电干扰等要求。

(1)体积较大。阀厅结构一般为双层建筑,上层布置阀本体、避雷器等,下层布置冷却设备如通风机、空调设备、阀的触发系统中处于地电位部分的装置等。阀厅尺寸受阀的体积、电压、检修及巡视方法等因素而定。上层主建筑一般高15~20 m,宽10~15 m,长18~30 m。为了减小体积,以减小空调容量,节约运行费用,往往在阀厅内四周不设巡回通道,检修则采用能移动的升降小车。大容量晶闸管阀的阀厅面积一般可按 $1\sim 2\text{ m}^2/\text{MW}$



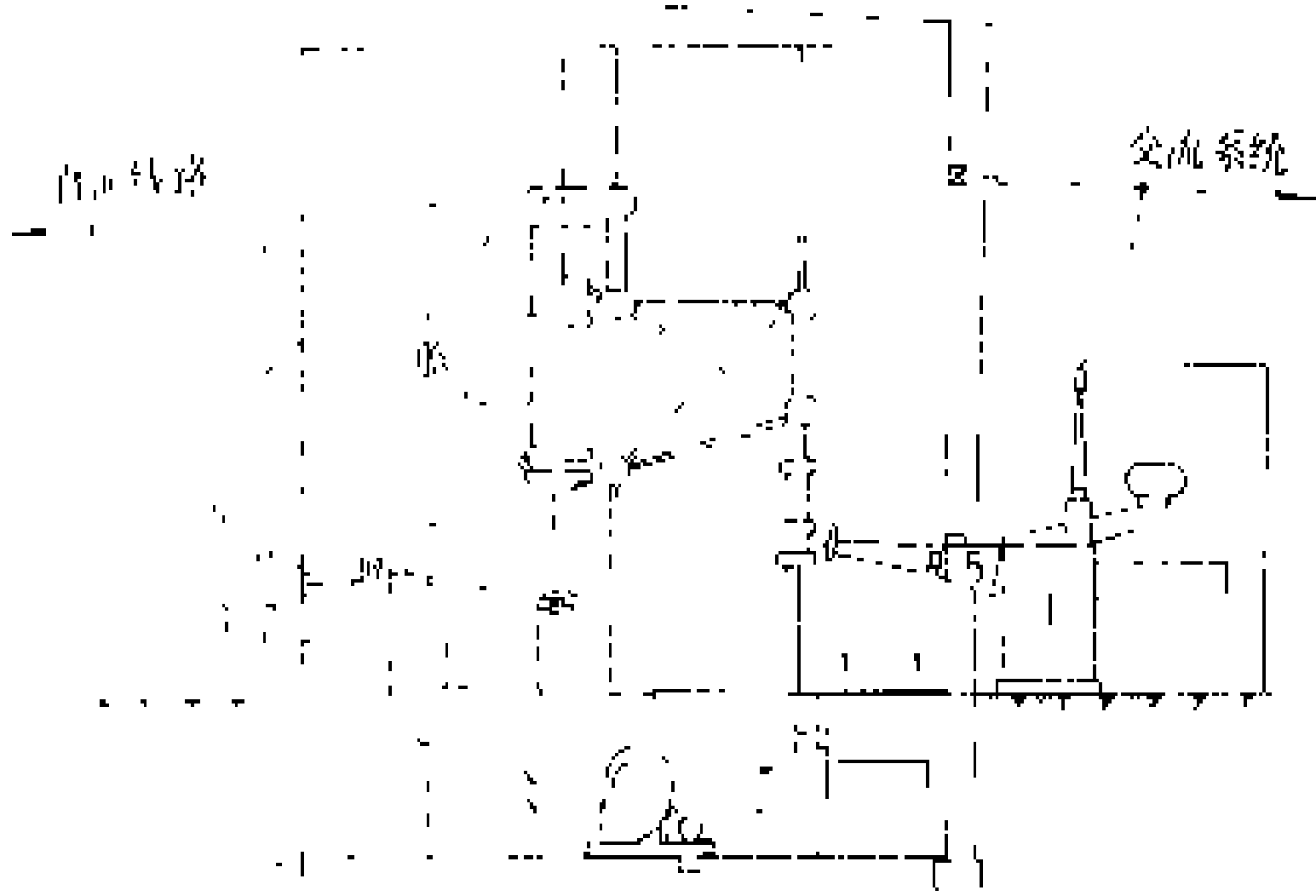
阀式避雷器的外形结构

重要参数。对带有串联间隙的阀式避雷器来说,表征保护特性的参数还应包括避雷器在雷电冲击和操作冲击下的放电电压。避雷器的雷电冲击残压应与雷电冲击放电电压相适应,操作冲击残压应与操作冲击放电电压相适应。雷电冲击残压或操作冲击放电电压与避雷器额定电压(峰值)的比,称为阀式避雷器的雷电冲击保护比或操作冲击保护比。保护比愈小,避雷器的保护性能愈好。

阀式避雷器在20世纪初即开始得到应用,早期的阀式避雷器以二氧化铅作为非线性电阻元件,其自恢复性能较差。30年代改用碳化硅作非线性电阻元件。50年代出现了用磁吹间隙取代普通平板间隙的磁吹避雷器,使避雷器的保护特性得到了很大的提高。70年代出现的以氧化锌为主要原料的非线性电阻片,具有优异的非线性特性,为无间隙避雷器的制作创造了条件。目前,无间隙金属氧化物避雷器已在逐步取代碳化硅避雷器。

(李启盛)

估算。



阀厅布置示意图

- 1—换流变压器;2—座装式晶闸管阀;3—平波电抗器;
- 4—避雷器;5—换流变压器瓷套管;6—直流侧阀厅穿墙套管

(2)密闭性好。换流阀对环境温度、湿度和含尘量均有严格要求,以保持阀体表面的清洁并防止凝露,因

此对布置阀本体的上层建筑,要有很好的密闭性,并设置空调系统以保证阀厅内的温度与湿度。阀厅内建立微正压,防止外界尘埃进入。对补充的空气须经严格过滤,并在阀厅出入口处加设更衣套间,以保持清洁。

(3)屏蔽无线电干扰。为了防止阀换相开通时所产生的无线电波对环境的干扰,布置阀本体的整个建筑需采取无线电屏蔽措施。常用的办法是将整个阀厅用金属材料构成,或在四周墙板中加屏蔽网。为防止交、直流高压出线将无线电干扰波引出到厅外,常将换流变压器阀侧绕组及平波电抗器两端的出线套管直接伸入阀厅中。

参见彩图插页第 39 页 119 图。

(郑德明)

Faguo Dianli Gongsi gaoya shiyanshi

**法国电力公司高压实验室** (high voltage laboratory of National Electric Power Company of France) 位于法国巴黎市南 80 km 处的雷纳第 (Renardieres), 建于 1970 年, 是欧洲最大的高电压实验室, 可进行特高压的试验研究。常习惯称之为雷纳第高压实验室。该实验室设有特高压试验大厅、超高压试验大厅及户外试验场。

特高压试验大厅的尺寸是 65 m × 65 m × 45 m (高), 双层钢结构, 外层为镀锌钢板, 内层为电磁屏蔽层。全部地面均敷设了铜板拉网并与内层屏蔽层相连接, 形成封闭的法拉第笼。交流电源经过高频滤波器和大厅的馈电系统相连。所有进出大厅的金属管道均与法拉第笼相连接。由于上述各项措施, 使大厅的屏蔽效果甚佳, 可达到 80 dB 以上。整个大厅可进行空调, 保持温度、湿度的恒定。

特高压大厅的主要设备有: 两台冲击电压发生器, 一台容量为 6 MV、450 kJ, 另一台为 1 MV、300 kJ; 一台 2.2 MV、0.5 A 的无电晕串级工频试验变压器; 一台 600 kV、30 mA 的直流高压发生器。全部大型设备底盘下均装有气垫。所有高压连接线及高压电极均采取措施以避免产生电晕。

由于特高压试验大厅的上述特点, 它特别适合于进行长空气间隙放电机理的研究。一个国际气体放电研究组织曾在这里进行了长达 15 年的试验研究工作。

超高压试验大厅尺寸为 43 m × 24 m × 20 m (高), 可进行 420 kV 等级的高压试验。厅内设有 15 m × 8 m × 15 m (高) 的人工气候室, 室内温度可在 -38℃ 到 +60℃ 范围内调节, 可进行设备的冷热试验。

户外试验场的面积为 3600 m<sup>2</sup>, 试验大厅内的试验设备可以借助气垫移到户外试验场进行试验。

(郑健超)

Fanchang 500 kV biandiansuo

**繁昌 500 kV 变电所** (Fanchang 500 kV sub-station)

位于中国安徽省繁昌县境内, 是淮南至上海 500 kV 输电工程的重要组成部分, 是连接华东电网的 500 kV 枢纽变电所。1984 年 5 月开始建设, 1986 年 12 月投入运行。

工程规模 繁昌 500 kV 变电所包括 500 kV、220 kV、15.75 kV 三级额定电压。500 kV 出线最终为 8 回, 本期 4 回。220 kV 出线最终为 9 回, 本期 4 回。15.75 kV 没有出线, 安装 4 × 45 MV · A 并联电抗器。全所最终将安装 500 kV、166 MV · A 单相自耦变压器 6 台, 本期 3 台, 500 kV、50 MV · A 并联电抗器 3 台。主要技术经济指标: 工程总投资 8747 万元 (1986 年), 总建筑面积 5147 m<sup>2</sup>, 土建开挖土方量 133000 m<sup>3</sup>, 回填土方量 147000 m<sup>3</sup>, 三材消耗量中钢材 2437 t, 水泥 8000 t, 木材 1100 m<sup>3</sup>。

总体布置 全所分为三个主要区域: ①500 kV 配电装置。长 355 m, 宽 200 m。500 kV 出线分成南北两个方向对侧出线。500 kV 主变压器引线垂直出线方向布置, 位于全所的西半部分。②主变压器区域。布置 6 台单相 167 MV · A 的 500 kV 主变压器, 4 台三相 45 MV · A 的 15.75 kV 低压并联电抗器以及主控制楼和通信楼。该区域长 200 m, 宽 85 m, 位于全所的中部, 是主控制楼布置在全所中央的总体设计方案, 具有控制电缆短, 巡视方便等优点。③220 kV 配电装置。长 280 m, 宽 80 m, 位于全所的东半部。整个变电所的总体布置采用主变压器在中间, 500 kV 和 220 kV 配电装置在两边对侧布置、垂直出线的设计方案。

主要电气设备 大部分是美国、德国、日本、瑞典、法国等 7 个国家 12 个公司的设备, 小部分是中國製造的设备。如西德 TU 公司的 500 kV 单相自耦变压器, 瑞典 ASEA 公司的 500 kV 单相并联电抗器, 德国西门子公司 的 500 kV 六氟化硫断路器, 法国 MG 公司的 500 kV 水平伸缩式隔离开关, 美国 GE 公司的系统继电保护装置, 瑞典 ABB 公司的载波通信设备。

高压配电装置 ①500 kV 配电装置。采用一个半断路器接线三列式布置方案, 断路器排成三列, 两组主母线分开布置在配电装置的两端, 500 kV 线路朝着两个相反的方向对侧出线, 500 kV 主变压器的连接线方向与出线间隔方向互相垂直。500 kV 配电装置采用分裂扩径导线。间隔宽度为 30 m, 电气设备和架空导线的相间距离都为 8 m, 相对地距离为 7 m。出线门型构架高度为 27 m, 架空地线柱高度为 8 m。所有高压电气设备都安装在地面的设备支架或基础上, 是典型的中型布置方案。②220 kV 配电装置。采用双母线带旁路母线接线, 设专用旁路断路器。为了提高电气主接

线的可靠性,一组工作母线采用断路器分段,另一组工作母线不分段,以保证当分段断路器或母联断路器发生故障时,全所仅失去 2/3 的电源和负荷,维持 1/3 的电源和负荷继续运行。为了节省占地,220 kV 配电装置采用高型布置方案,共分为三层:220 kV 六氟化硫断路器布置在最下层,中间层为 220 kV 隔离开关,220 kV 母线布置在最高层。

参见彩图插页第 10 页 31 图

(蓝增廷)

fanbianhuan guodianya

**反变换过电压** (inverse transfer overvoltage) 见配电变压器防雷。

fanji

**反击** (inverse stroke) 由于雷电流流过使正常情况下处于低电位的导体(包括接地导体)的电位升高,引起该导体向正常情况下处于高电位或其他仍处于低电位的导体放电的现象,又称逆闪络。

雷击避雷针时,雷电流流经避雷针所形成的电位升高可经空气或地中反击到被保护设备,使被保护设备上出现过电压。雷击杆塔或避雷线时,雷电流流经杆塔所造成的塔顶电位升高可反击到输电线上,造成沿线路传播的过电压波。雷击于无避雷线的线路时,一相对杆塔接地闪络所造成的杆塔电位升高可反击到另一相(或两相)线路上,造成两相(或三相)接地短路以及沿两相线路(或三相线路)传播的过电压波。

见变电所防雷、线路防雷。

(陈慈萱)

fei-quan-xiang yun-xing guo-dian-ya

**非全相运行过电压** (overvoltage in incomplete phase operation) 电力系统在非全相运行条件下产生的铁磁谐振过电压。造成非全相运行的原因,是断路器的分相切合、分相拒动和三相触头间的不同期动作,以及高压熔断器分相熔断和不对称分合操作等。

非全相运行过电压与断线谐振过电压的性质基本相同,区别在于非全相运行的断线点发生在断路器或熔断器处,非全相运行的谐振回路中不存在接地故障。

超高压长线路中普遍设置并联电抗器,在单相重合闸过程中,当单相(a相)开断和潜供电弧熄灭后,健全相通过对被开断相的相间电容  $C_{12}$  而形成传递谐振回路,如图 1 所示。图中忽略了导线电感和电源漏抗,  $L$  为电抗器的正序电感,  $L_N$  为电抗器中性点的附加电感,  $C_0$  为导线的对地电容,  $\dot{U}_b$  和  $\dot{U}_c$  为健全相电

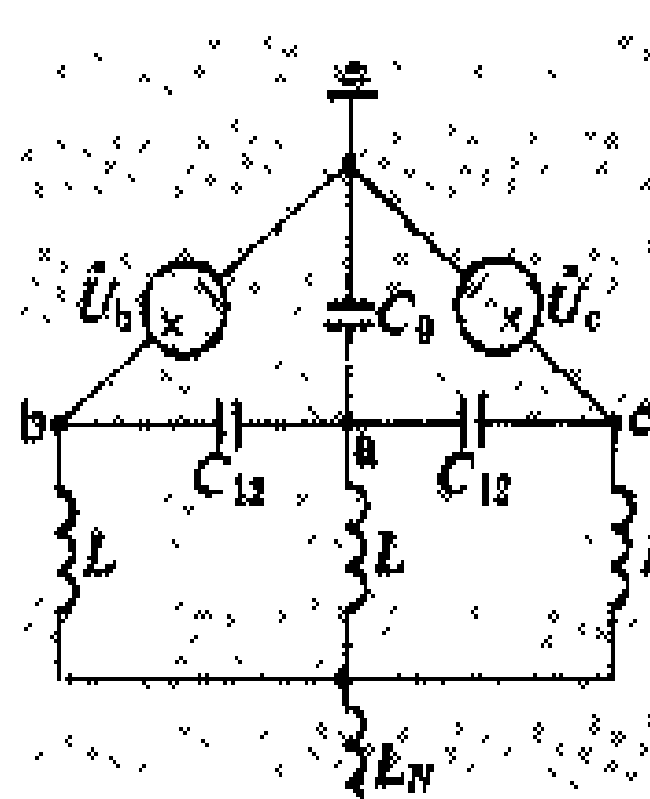


图 1 单相开断后的传递谐振回路

压,电抗器的补偿度为  $T_K = 1/[\omega^2 L (C_0 + 3C_{12})]$ 。在  $L_N = 0$  时,谐振条件为  $\omega L = 1/[\omega (C_0 + 2C_{12})]$ ,或者  $T_K = (C_0 + 2C_{12}) / (C_0 + 3C_{12})$ 。通常采取  $T_K < 1$ ,故单相开断的结果使得回路接近于谐振状态,如果  $T_K < (C_0 + 2C_{12}) / (C_0 + 3C_{12})$ ,即  $\omega L > 1/[\omega (C_0 + 2C_{12})]$ ,则可能

激发起工频铁磁谐振。这些情况都使电弧不能自熄,导致断路器重合失败。为此,如在相间并接电感  $L_{12}$  (见图 2),使得  $\omega L_{12} = 1/(\omega C_{12})$ ,以形成并联谐振,阻塞了相间联系,非全相铁磁谐振就可被抑制。此时,图 2 中的零序电感大于正序电感,故实际上可通过接入附加

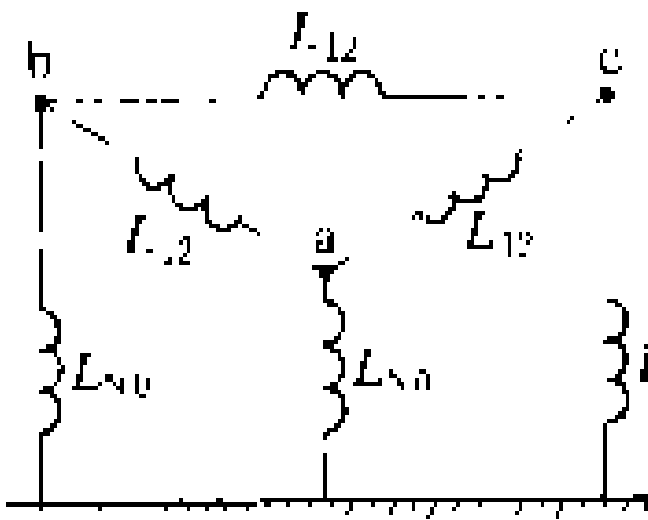


图 2 并接相间电感后的接线图

电感  $L_N$  来达到目的。

令  $L_0$  为电抗器本身的零序电感,则有  $L_{N0} = L_0 + 3L_N$ ,

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_{N0}} + \frac{3}{L_{12}} = \frac{1}{L_0 + 3L_N} + 3\omega^2 C_{12}, \text{ 由此得}$$

$$L_N = \frac{1}{3} \left( \frac{T_K L}{T_K - T_0} - L_0 \right), T_0 = \frac{3C_{12}}{C_0 + 3C_{12}}$$

单相电抗器组的  $L = L_0$ , 故  $L_N = \frac{T_0 L}{3 (T_K - T_0)}$ 。

在计划性合闸的第一阶段或计划性分闸的第二阶段,导线处于空载状态,如断路器分相拒动成不同期动作,将会形成与上述相仿的谐振回路,附加电感  $L_N$  可以同样起到消除谐振的作用。

(陈维贤)

fenlie bianyaqi

**分裂变压器** (split - low - voltage windings transformer) 每相由一个高压绕组与两个或多个电压和容量均相同的低压绕组构成的多绕组电力变压器。

分裂变压器正常的电能传输仅在高、低压绕组之间进行,而在故障时则具有限制短路电流的作用。分裂变压器的低压绕组也称分裂绕组,可单独或并联运行,当某一个低压绕组上所连接的负荷或电源发生故障时,其余低压绕组仍能正常运行。各分裂绕组之间没有电的联系,磁的耦合也相对较弱。各分裂绕组的总容量就是该分裂变压器的额定容量。具有两个低压绕组的分裂变压器通常称为双分裂变压器,其低压绕组的布置方式有辐(径)向分裂和轴向分裂两种。

分裂变压器通常被用作发电厂中两台发电机共用

的升压变压器,或大型机组发电厂中的厂用变压器。它的主要特点是:①当低压侧的一个绕组发生故障时,具有限制短路电流的作用;②能减少无故障分裂母线相连的电动机向短路点的反馈电流;③保持无故障母线有较高的残压;④与同容量的普通变压器相比,分裂变压器消耗的原材料较多。

分裂变压器的阻抗特性,通常由下列4个参数表示:①穿越阻抗 $Z_c$ :将分裂为几部分的低压绕组并联所测得的高低压绕组间的短路阻抗,一般低于普通变压器的短路阻抗;②半穿越阻抗 $Z_b$ :分裂部分的一个低压绕组与高压绕组之间测得的短路阻抗(其余低压绕组开路);③分裂阻抗 $Z_F$ :被分裂的两个低压绕组之间的短路阻抗(如有其余低压绕组,在测量时将其开路);④分裂系数 $K_F$ :分裂阻抗与穿越阻抗之比值,即 $K_F=Z_F/Z_c$ , $K_F$ 的具体数值通常按分裂变压器的正常运行和事故状态对电压的要求选取,一般为1~4。

(凌 悠)

fenlie daoxian

**分裂导线** (bundle conductors) 超高压输电线路中每相由多根导线并联组成的导线束。导线束中的每根导线称为分裂导线的子导线。高压输电线路通常每相采用一根导线,根据输送功率大小,决定导线的截面。超高压输电线路由于电压高,导线表面电场强度很高,当导线的电场强度超过了空气的电气强度时,导线周围的空气开始游离,产生电晕放电,引起电能损耗和对无线电的干扰,并使输电线路的高频载波通信发生困难。导线表面电场强度

$$E = 0.0147 \frac{C_p U}{r_0}$$

式中 $E$ 为导线表面电场强度(最大值),kV/cm; $C_p$ 为线路相工作电容,pF/m; $U$ 为线路运行电压(有效值),kV; $r_0$ 为导线的半径,cm。 $C_p$ 值与导线的布置方式有关,当线路工作电容和导线布置方式不变时,加大导线直径,可降低其表面电场强度,从而减轻电晕放电程度,但需要多耗费有色金属,是不经济的。于是人们开始研究空心导线和扩径导线,或将每相导线分裂为两根及以上的导线束,这样就可以用较少的有色金属取得相当于大直径导线的效果,使得按经济电流密度和按电晕条件所选择的每相导线总截面的差别缩小甚至达到一致,从而改善输电线路的技术经济指标。早期建设的287~345 kV级超高压输电线路,曾经采用过单根大直径的空心导线和内加填充物的扩径导线,但这类导线制造比较复杂,价格昂贵,施工安装也不方便。如用于380 kV级线路,则单根直径大约需50~60 mm,技术上经济上都不理想。所以在380~400 kV级

及以上电压的超高压输电线路中,一般都采用相分裂导线。

相分裂导线的电气特性 相分裂导线有一个公共的电场,如图1所示,导线表面的平均电场强度降低,从而使导线开始发生电晕的电压得以提高,电晕放电引起的电能损耗和对无线电的干扰均可减少。400 kV输电线路每相采用不同直径和不同分裂根数的导线时每千米电晕损耗值见表1。

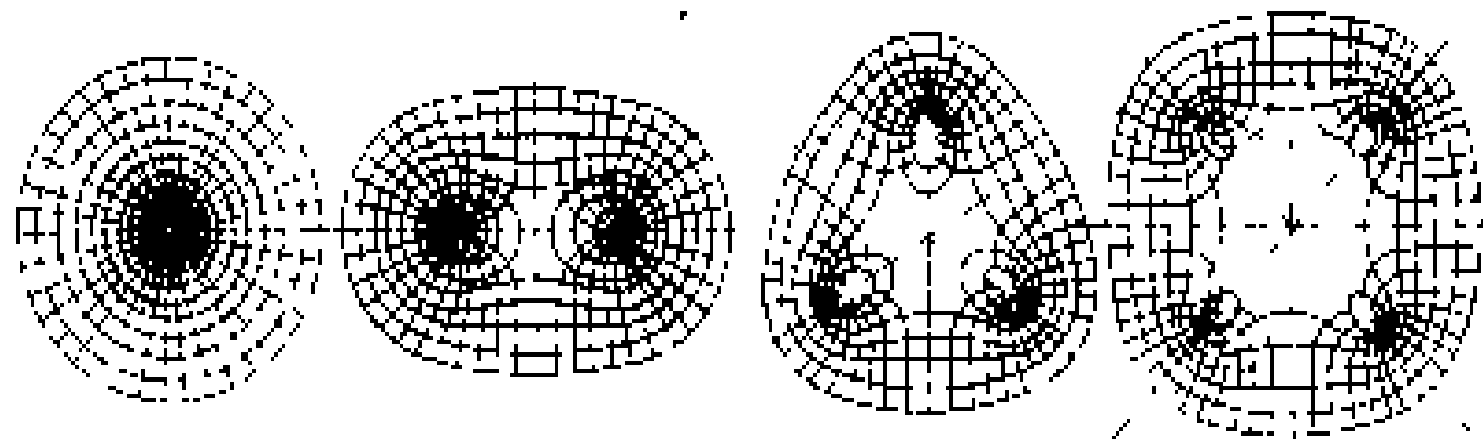


图1 单根导线和分裂导线的电场

表1 分裂导线电晕损耗表

每根导线的直径及分裂根数	电晕损耗 (kW/km)
直径 50 mm 的单根导线	5.0
直径 45 mm 的二根导线	2.5
直径 30 mm 的三根导线	0.7
直径 25 mm 的四根导线	0.3

分裂导线相当于增大了导线的直径,因此输电线路的电容增大,电感减小,使输电线路的波阻抗减小,自然功率增大。表2列举了500 kV分裂导线线路的电抗、波阻抗和自然功率等参数随每相分裂导线的根数而变化的数值。当每相导线总截面恒定时,由单根导线改为两根分裂导线,增加输送能力21%;改为三根分裂导线,增加输送能力34%;改为四根分裂导线,则增加输送能力43%。

表2 分裂导线电气参数表

线路参数	相分裂导线根数			
	1	2	3	4
电抗 ( $\Omega$ /km)	0.4	0.33	0.3	0.28
波阻抗 ( $\Omega$ )	375	310	280	260
自然功率 (MW)	670	810	900	960

相分裂导线的结构选择 从减少电晕放电和增加输送能力两方面考虑,每相导线的分裂根数越多越有利,但通常要受到许多结构上的限制。超高压输电线路为保证一定的机械强度和较高的运行可靠性,不宜采用截面太小的导线。另一方面,由于分裂根数增多,每相导线总的受风面积增大,导线自重以及线上的覆冰重也增加,又会引起杆塔的水平 and 垂直荷载增大,导致杆塔和杆塔基础的材料和工程量加大。同时,分裂根数

增多，线路金具及导线的施工安装工作更加复杂化等等，均会影响线路造价。此外，相分裂导线根数多，导线电容加大，引起导线下面的电场强度增高。从线路对生态环境影响的要求考虑，需要加大导线对地面的距离，加高杆塔，也会增加线路投资。

分裂导线的结构包括子导线间的间距以及子导线的布置方式，还涉及到导线的电容值的变化，影响到电晕效应以及线路自然功率的大小和线下静电感应场强的数值。为避免覆冰时各子导线冻结在一起，子导线互相间需要保持一定间距，但间距过大，将会增大线路杆塔的尺寸。导线布置的几何形状复杂，也会给金具结构带来困难。这一系列的技术特性又与经济指标密切相关，在线路工程设计中，需权衡各方面的利弊，进行技术经济综合比较，选择比较合适的分裂导线结构方案。一般2分裂导线多数采用水平排列，也有采用垂直排列或斜向排列的；3根以上分裂导线，则布置在多边形的各个顶点，如3分裂导线布置在正三角形的三个顶点，4分裂呈矩形布置。子导线间距一般都在400~500mm之间。为了使分裂导线在受到各种外力作用时，在档距中能够保持其原布置的几何形状，以保证输电线路的电气参数不致改变，在分裂导线的子导线间安装若干间隔棒（见架空输电线路金具）。两相邻间隔棒之间的距离称之为次档距。间隔棒的作用还在于防止当子导线受风力或短路电流产生的电动力的作用下互相鞭击。

相分裂导线的使用情况 各个国家导线、金具的制造条件不同，线路建设和运行的经验各异，超高压输电线路的分裂导线也采用不同的方案。330~345 kV级输电线路，在中国、苏联、美国、加拿大等国多数采用2根分裂导线；美国也有一些345 kV输电线路采用单根大直径导线。380~400 kV级输电线路，在法国、意大利、瑞典、芬兰等国多数采用2根分裂导线；英国、德国则多数采用4根分裂导线。500 kV级输电线路，中国、加拿大、日本等国采用4根分裂导线；苏联采用3根分裂导线；美国多数采用2根分裂导线，也有一部分用3根分裂导线。735~765 kV级输电线路，美国、苏联、加拿大等国均采用4根分裂导线。至于1000 kV及以上特高压输电线路，则需要8根或10根分裂导线。此外，有一些220 kV级输电线路也采用2根分裂导线，主要是为了提高输电容量。原为单导线的现有高压输电线路，在升压

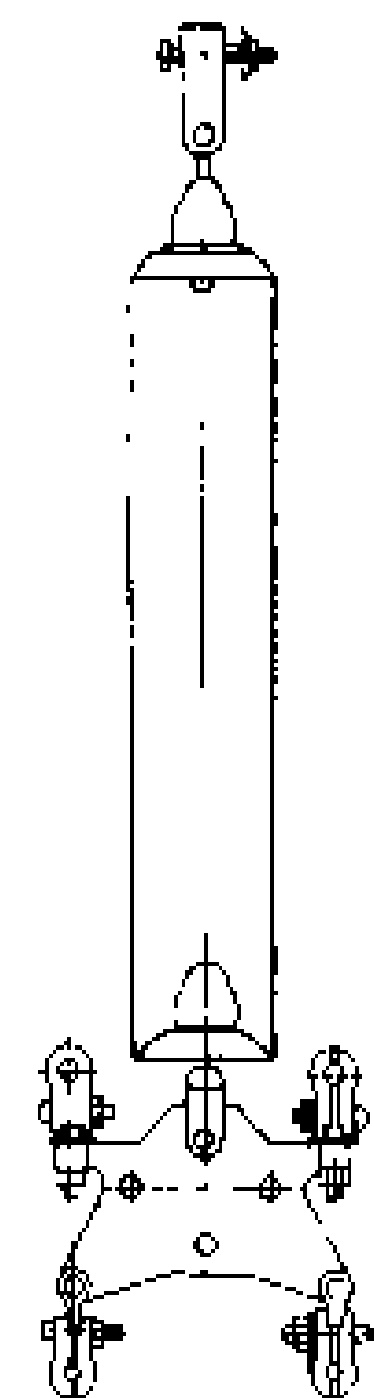


图2 中国500 kV线路上的分裂导线连接方式

增容改造时，也可改用分裂导线。各国超高压输电线路分裂导线的形态多种多样。中国500 kV输电线路最常用的4根分裂导线与上扛式防电晕线夹，及其与悬垂绝缘子串的连接方式见图2。

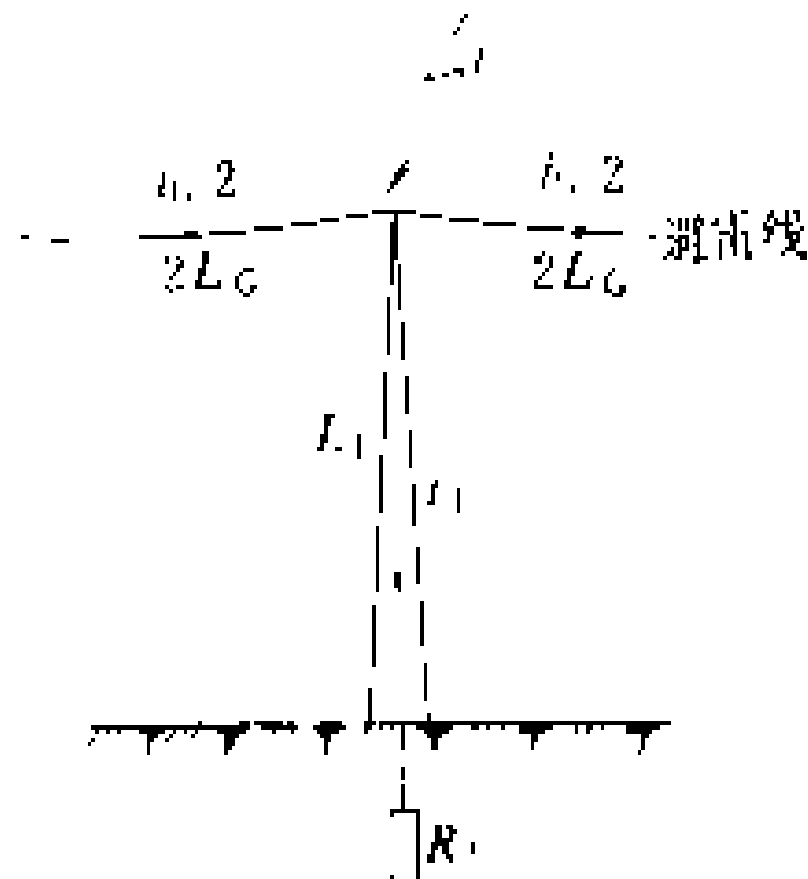
(黄志明)

fenliu xishu 分流系数 (shunted coefficient of lightning current)

雷击装有避雷线的杆塔时，只有部分电流直接经由杆塔入地，流经杆塔的雷电流 $i_T$ 和总的雷电流 $i$ 的比值称为分流系数，用 $\beta$ 表示。如图所示，雷击杆塔时的分流系数计算公式可近似写成

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{L_T}{L_G} + \frac{R_T}{L_G} \times \frac{\tau}{2}}$$

式中 $L_T$ 为杆塔的电感， $\mu\text{H}$ ； $2L_G$ 为每档避雷线的等值



由杆塔入地的电流

电感， $\mu\text{H}$ ； $R_T$ 为杆塔的冲击接地电阻， $\Omega$ ； $\tau$ 为雷电流的波头时间， $\mu\text{s}$ 。降低分流系数，可以提高线路的耐雷水平，降低其雷击跳闸率。表中列出了 $\tau = 2.6\mu\text{s}$ 时一般线路的分流系数值。

分流系数  $\beta$

额定电压(kV)	避雷线根数	分流系数
110	1	0.90
	2	0.86
220	1	0.92
	2	0.88
330	2	0.88

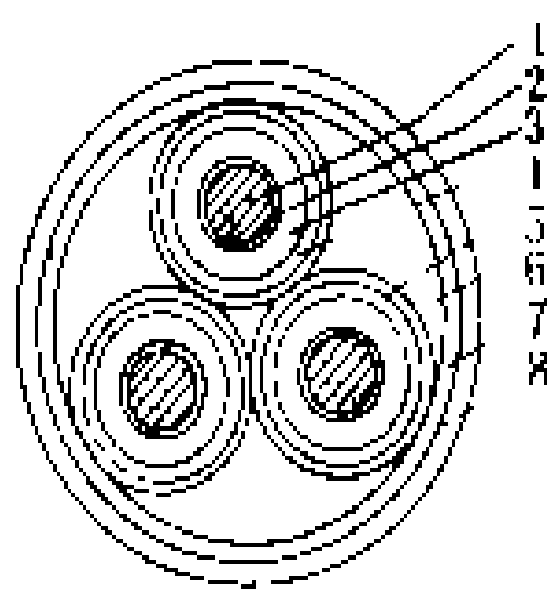
(陈慈萱)

fenqianxing dianlan 分铅型电缆 (separate lead sheathed cable)

每个绝缘线芯外挤压铅套，然后将三个铅套的绝缘线芯绞合成缆，填充成圆形后再加绕钢丝或钢带铠装，在其外绕包或挤压外护层的油浸纸绝缘电缆，又称SL电缆。分铅型电缆的结构如图所示，它主要用于20~35kV的电力电缆线路中。

分铅型电缆是应用了屏蔽型电缆的原理发展起来

的,在其绝缘层中的电场方向均垂直于绝缘纸带表面,而且铅套内不用填料,减少了浸渍剂的流动性。它和屏蔽型电缆相比尚有以下优点:①如一根线芯的绝缘击穿时,不易发展成为相间故障,修复工作较简单;②终端和连接接头结构较简单;③浸渍纸绝缘的用油量较少;④处于相同的弯曲半径时,纸绝缘层间的相对位移比较少。



分相铅包电缆结构  
1—导线;2—导线屏蔽;  
3—绝缘层;4—绝缘屏  
蔽;5—铅护套;6—内衬  
垫及填料;7—铠装层;  
8—外被层

分铅型电缆与屏蔽型电缆相比具有较多优点,因此在中国及欧洲一些国家,大多采用分铅型电缆。但在20世纪60年代固体挤压聚合电缆发展后,分铅型电缆与其他纸绝缘电缆一样,逐渐被淘汰。

#### 参考书目

刘子玉,电气绝缘结构设计原理,北京:机械工业出版社,1981

Barnes C. C. Power Cable; Their Desing and Installation. London; Chapman & hall Ltd, 1953

(桑纪明)

fenzhi dianlan jietou

### 分支电缆接头 (branch joint; tee joint)

用于将三根或四根电缆相互连接在一起的电缆接头。通常是在一条10kV或以下的主电缆线路上支接另一条电缆线路时用。分支电缆接头可以根据电缆线路的方向,采用各种不同的方式作成分支,如垂直于主电缆、与主电缆成一个角度或成十字形等。按其外形不同,分支电缆接头可分为T型、Y型和十字型三种。T型和Y型的使用较多,T型接头也称作丁字接头。

分支电缆接头的特点是一条线路可同时送电到二或三个地点或用户,其缺点是接头内的绝缘不易处理,接头壳体密封也较困难,因此它不适用于高压电缆。分支电缆接头的另一缺点是当分支电缆故障时,主电缆必须同时停电才能修理。

分支电缆接头虽一度有所发展,但由于与电缆分支箱相比,缺点较多,因此逐渐被淘汰。然而,自固体挤压聚合电缆发展后,低压的分支电缆接头又有发展,特别是可带电装卸的分支电缆接头,可减少低压电力系统的停电次数。

导体连接 通常用异形连接管(一侧为单孔,另一侧为双孔)以锡焊法连接。1kV以下的导体,常用螺钉机械法连接。

绝缘恢复 裸露的连接管除绕包绝缘带外,也有

用特制的瓷隔板将连接管分隔开,并保持对壳体的距离,再灌注绝缘胶。

接头壳体 将铅套管一端敲成椭圆形,纳入二根电缆后分别用封铅密封,也有用一端为一孔另一端为双孔的特制壳体,三孔各纳入一根电缆。低压电缆常以保护用灌注防水电缆胶(如环氧树脂或沥青胶等)代替接头壳体。

(屠俊良)

Fengman Lishizhai shudian xianlu

### 丰满—李石寨输电线路 (Fengman - Lishizhai transmission line)

中国自行设计和施工的第一条220kV高压输电线路,即506工程,简称松东李线。该线路起自丰满水电站,经虎石台变电所至抚顺市西南的李石寨变电所,是中国东北高压电网向沈阳、鞍山、抚顺、本溪等重要工业区送电的主要干线,全长370km,单回路。这条线路的建成,为中国高压输电线路建设提供了经验。

该线路经过地区地形复杂,其中山区占31%,丘陵占37%,平地及洼地占32%。线路跨越铁路6处,公路25处,通信线32处,110kV以上电力线路16处,河流32处。

全线路共有铁塔919基,其中直线塔725基,耐张塔137基,转角塔57基,平均耗钢22.4t/km。铁塔共有11种塔型,主要塔型为酒杯型(见杆塔)。导线牌号为ACY-400加强型钢芯铝绞线,架空地线型号为7/3.5和7/4.0两种镀锌钢绞线。采用Π-4.5型瓷绝缘子,直线塔所用绝缘子串为单串悬垂串,耐张塔用双串并联,每串均为14片绝缘子。塔基为混凝土基础,分预制、配筋及无筋三种,平均混凝土量为25.1m<sup>3</sup>/km。(见杆塔基础)

该线路由四个工程队分12个工地施工。在施工中采取分段包干和流水作业的方法,在同一时期内只进行一种作业,如基础、组塔、架线等。限于当时的设备情况和技术水平,施工主要靠人力进行,如用人力放线、用绞磨立塔和紧线等。线路造价8.89万元/km,每千米施工用工量为1258工日。线路于1953年7月20日破土动工,于1954年1月23日竣工,并于当月27日并网送电,工期仅为半年。

参见彩图插页第3页7图。

(胡维新)

fengbishi kaiguangui

### 封闭式开关柜 (enclosed switchgear panel)

除进、出线外所有元件都完全被接地金属外壳包围住的开关柜。有固定式和移开式两种,移开式又包括

手车式和抽屉式。按其结构不同还可分为金属铠装式、间隔式及箱式三种。

**金属铠装式开关柜** 各组件按一定组合方式分别装在以接地金属板隔开的间隔中，金属隔板有不同的防护等级（见开关柜试验），但用作静触头的隔板或能插入动触头的活门，可以是金属的，也可以是由非金属的绝缘材料制成。绝缘材料的活门，不属于外壳的一部分，通常用作加强相间及对地的绝缘。金属铠装式开关柜的下列组件一般均设置在单独的间隔里：①每一组主断路器；②连向主断路器一侧的组件（如直配线路）；③连向主断路器另一侧的部分（如母线）。如果有多组母线，将每组母线分设于单独的间隔内。

**间隔式开关柜** 其结构与金属铠装式开关柜基本相同，但它具有一个或多个非金属隔板。

**箱式开关柜** 不设隔板或少设隔板的金属封闭开关柜。它具有金属接地外壳，在规定的防护等级下，保护内部设备不受外界影响，防止入体和外物接近带电部分和触及运动部分，但间隔的数目少于金属铠装式或间隔式开关柜。

参见彩图插页第 23 页 70 图。

（顾竞鸿）

Fuerjia Gele Mosike shudian xianlu

**伏尔加格勒—莫斯科输电线路**（Volgo-gradskaja - Moscow transmission line）世界上第一条 500 kV 输电线路，是苏联欧洲部分联合电力系统的主干线之一，设计输送容量为 1500 MW，设计年平均送电量  $8.0 \times 10^6 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 。该线路由两条单回路组成，伏尔加格勒水电站—新尼古拉耶夫段为 295 km，新尼古拉耶夫—利佩茨克段 254 km，利佩茨克—梁赞段 231 km，梁赞—莫斯科南郊段 184 km，梁赞—莫斯科西郊段 213 km，莫斯科南郊—西郊段 27 km，总计回路长度约 2000 km。

该线路大部分采用自立式门型杆塔，单基杆塔重 8.6 t，呼称高 27 m。有两根架空地线，其保护角为  $15^\circ \sim 20^\circ$ 。线路绝缘水平按内部过电压为 2.5 倍相电压设计，相间距离 10.5 m。悬垂绝缘子串为  $\Pi-8.5$  型瓷绝缘子 20 片，耐张绝缘子串用  $\Pi-11$  型瓷绝缘子 20 片。利佩茨克—梁赞西部地区的 93 km 线路采用拉线门型杆塔，单基杆塔重 7.2 t。此外还建设了 3 km 拉线钢筋混凝土杆作为试用，其杆身及横担均采用长 22 m、外径 56 cm 预应力钢筋混凝土管，单基杆重 13.7 t，耗钢量 2.34 t（不含基础）。

该线路的导线为每相三分裂 ACO-480/60 轻型钢芯铝绞线，分裂间距为 40 cm，采用双卡式间隔棒。（见分裂导线）

该线路有几处跨越通航河道，其中最大跨越的是奥卡河，跨河杆塔采用自立式门型铁塔，塔高 65 m，重 93 t，跨距为 800 m，采用混凝土块式基础（见杆塔基础）。两个跨河直线塔至耐张塔的档距分别为 300 m、400 m。耐张塔高 20 m，重 65 t。跨河段导线采用钢芯铜绞线，牌号是 CE-300/167，架空地线采用 C-100 型镀锌钢绞线。

全部工程共组立各种类型铁塔 5500 基，其中直线塔 4850 基，耐张塔和转角塔 650 基。线路每千米造价为 301 千卢布（1959 年），输电成本为 1.66 戈比/（kW·h），比 400 kV 线路低 13.5%。该线路于 1959 年底开始投入运行。

（胡维新）

fuzhu dianlan

**辅助电缆**（auxiliary cable）电力电缆线路二次回路中使用的电缆线路控制电缆和信号电缆的总称。其功能是：当电力电缆线路异常运行时发出报警信号；发生故障时启动保护装置，迅速跳闸切断电源，不使事故扩大。

由于辅助电缆不输送电力负荷，因此它的导体截面积较小，但为了满足连接可靠和机械强度要求，必须采用铜导体，其截面不小于  $1.5 \text{ mm}^2$ ，绝缘水平要满足使用电压的要求。辅助电缆的结构同电力电缆基本一样，有导体、绝缘层和外屏蔽层、金属护套、铠装等。早期的产品，绝缘材料用粘性浸渍纸或普通橡皮绝缘，近代的产品采用固体挤压绝缘较多，如聚氯乙烯、聚乙烯、乙丙橡胶等。

通常辅助电缆与单芯电力电缆平行敷设时，要考虑电力电缆电磁场对它的感应电压，以免影响保护装置动作的正确性。尤其是 110 kV 及以上中性点有效接地系统，当发生单相接地故障时，由零序电流产生的感应电压，对辅助电缆的危害性更大，严重的甚至会损坏二次回路设备或威胁人身安全。因此，长距离平行敷设于高压电缆的辅助电缆，为了防止和解决干扰的影响，除了高压电缆本身采取必要的措施外，要采用有高屏蔽效果的辅助电缆。

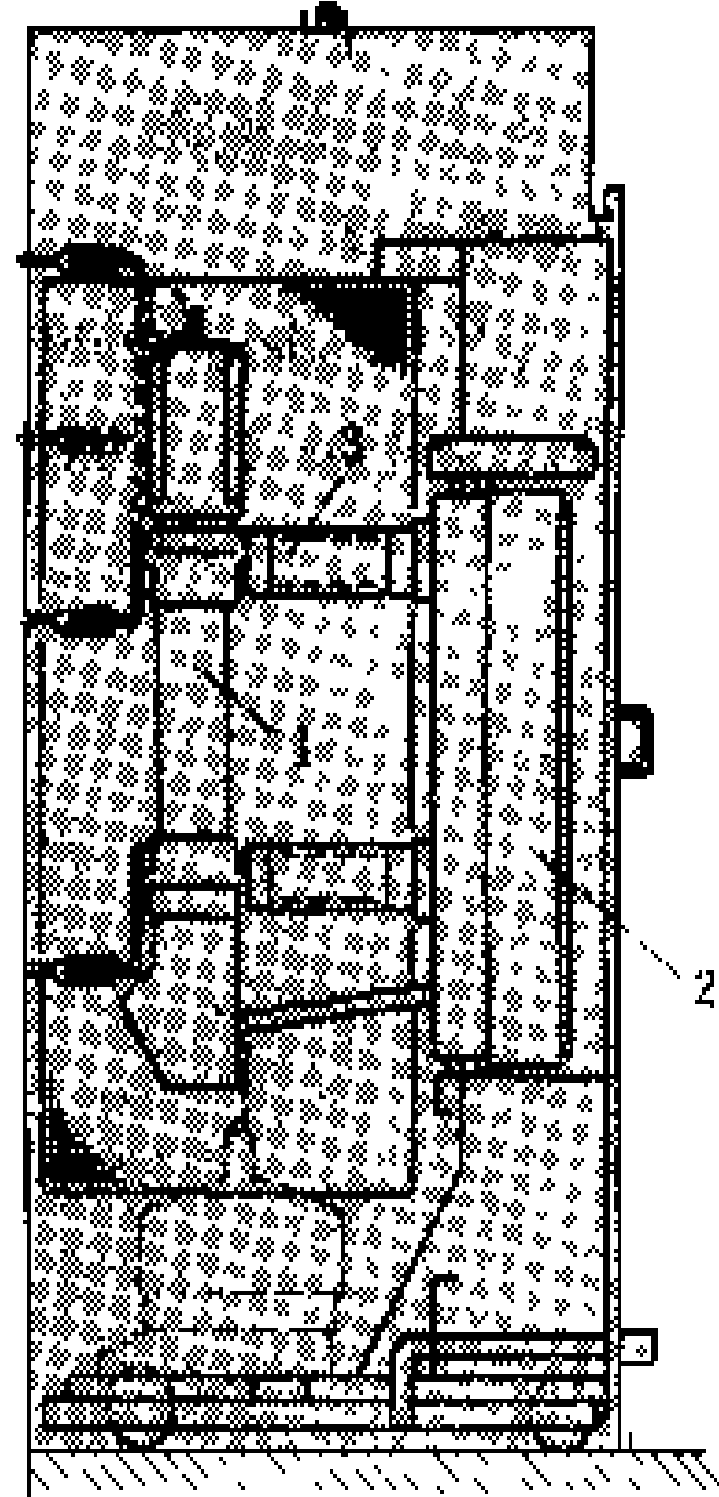
（许精潜）

luhe kaiguan

**负荷开关**（load switch）一种主要用于承载、关合、开断正常条件下（也包括规定的过负荷条件）的电流，并能通过规定的异常（如短路）电流的开关设备。有的负荷开关也能关合较小的短路电流。负荷开关一般由灭弧装置、操动机构和支柱绝缘子等部分组成，其结构如图所示。



负荷开关按其不同用途可分为普通型和专用型两种。普通型负荷开关能完成配电系统中正常的各种关合和开断操作；专用型负荷开关是供特殊条件下使用的，例如专门用于电容器频繁操作的负荷开关称为电容器负荷开关。按其灭弧介质及灭弧方式不同可分为产气式、压气式、充油式、真空式及 SF<sub>6</sub> 式等。按其安装地点不同分为户内式和户外式。按其操作方式不同又可分为一般操作和频繁操作负荷开关，三相操作和单相操作负荷开关，动力操作、手力储能操作和手力操作负荷开关。有的负荷开关还带有隔离间隙，具有隔离电路的作用。



负荷开关  
1—灭弧装置；2—操动机构；3—支柱绝缘子

产气式负荷开关的灭弧腔内装入有机玻璃衬管，在开断时工作触头之间电弧产生的高温，使有机玻璃衬管分解，产生强气流，吹灭电弧。真空式负荷开关的灭弧室结构是一个真空泡，利用真空条件进行灭弧。负荷开关每开断一次对灭弧结构和触头都有一定的烧损，通常以不更换灭弧室结构的开断次数（电寿命）作为表征负荷开关性能的一项重要指标。真空式比产气式的电寿命要长得多，在需要频繁操作的地方一般都选用真空式负荷开关。

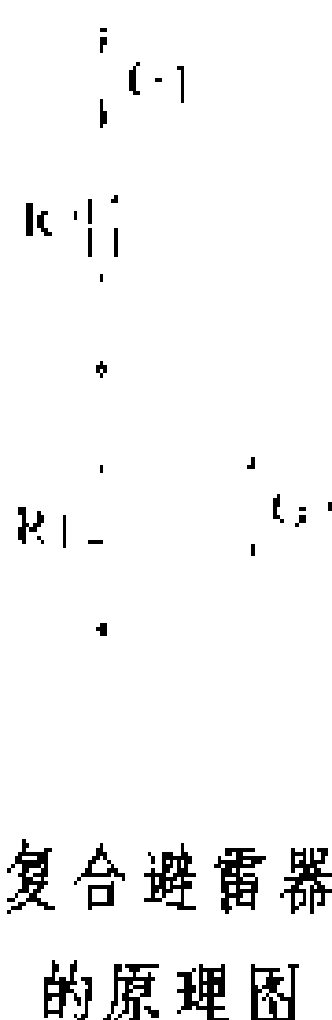
由于负荷开关的灭弧室结构较简单，甚至不用灭弧室，在特定场所中使用，经济而又简便，因而世界各国都广泛采用。在中国主要生产 3、6、10 kV 户内型负荷开关，用以操作 1000~1800 kV·A 及以下的变压器，600~1500 kW 及以下的高压电动机或 400 kvar 及以下的电容器组。在 500 kV 超高压电力系统内，有的 500 kV 主变压器第二绕组 35 kV 侧需要安装无功补偿电容器和电抗器组，为此需要选用 35 kV 户外型真空负荷开关，以满足频繁操作的需要。真空负荷开关是今后一个时期的发展方向。也有将负荷开关与高压熔断器组合成一个整体的组合式负荷开关，用负荷开关来切断负荷电流，用高压熔断器来切断短路电流及过负荷电流，以代替高压断路器。

参见彩图插页第 23 页 69 图。

(蓝增廷)

在部分阀片上并联放电间隙的磁吹避雷器。复合避雷器具有较高的额定电压和较低的雷电冲击残压，能吸收较大的操作过电压能量，其保护比可达 1.39。复合避雷器通常应用在 500kV 及以上电压等级的电力系统中，它既能限制雷电过电压，又能限制操作过电压。

图示为复合避雷器的原理图。在雷电过电压作用下，主间隙 G1 放电，当 R2 上的残压上升到一定值后，并联放电间隙 G2 也放电，把避雷器的雷电冲击残压限制在较低的水平，由 G1、G2 和 R1 实现对雷电过电压的限制。在操作过电压的作用下，当通过可能的最大操作波电流时，并联间隙 G2 不得动作，由 R1 和 R2 共同限制工频续流并吸收操作过电压的能量。



复合避雷器于 20 世纪 60 年代初在苏联研制成功，并得到应用。美国和中国也曾生产和使用过这种避雷器，目前它已被金属氧化物避雷器所取代。

#### 参考书目

Шилман Д. В. Вентильные Разрядники Высокого Напряжения. Энергии, 1978

(李启盛)

fuhe dianya shiyan

#### 复合电压试验 (compound voltage tests)

将两个独立电源的电压施加在被试品的两端或一端，用以考核被试品在两种电压同时作用下的电气强度。电气设备在运行中遭受雷电过电压或内部过电压作用时，其绝缘可能会承受两个过电压的联合作用，或过电压和工作电压的叠加或联合作用，因此，对某些电气设备需要进行复合电压试验。复合电压试验分为联合电压试验和叠加电压试验。复合电压是以前两个电压分量的各自波形、峰值和极性来表征。

联合电压试验 在被试品的两端同时施加冲击一冲击、冲击一交流或冲击一直流电压的试验。这两个电压通常是反极性的。进行冲击一冲击电压试验时，通常使两个反极性冲击电压的峰值在同一时刻出现，若不同时出现，则认为两个冲击电压存在时差，并以正极性冲击电压峰值滞后于负极性冲击电压峰值的时间为正时差，反之为负时差。进行冲击一交流电压试验时，通常在工频电压的峰值处施加反极性的冲击电压。联合电压试验的电压值是以正极性电压的峰值与对应于正峰值时刻的负极性电压瞬时值的绝对值之和来表示。对交、直流输配电设备的相间或极间绝缘、断路器断口

fuhe bilerqi

#### 复合避雷器 (combined surge arrester)

间绝缘以及输电线路的绝缘子串等，均需要以联合电压试验来检验其强度。

叠加电压试验 在被试品的同一端施加两个独立电源的电压，这两个电压通常是同极性的。根据不同试验的要求，可以是冲击与冲击、冲击与交流或冲击与直流电压的叠加。

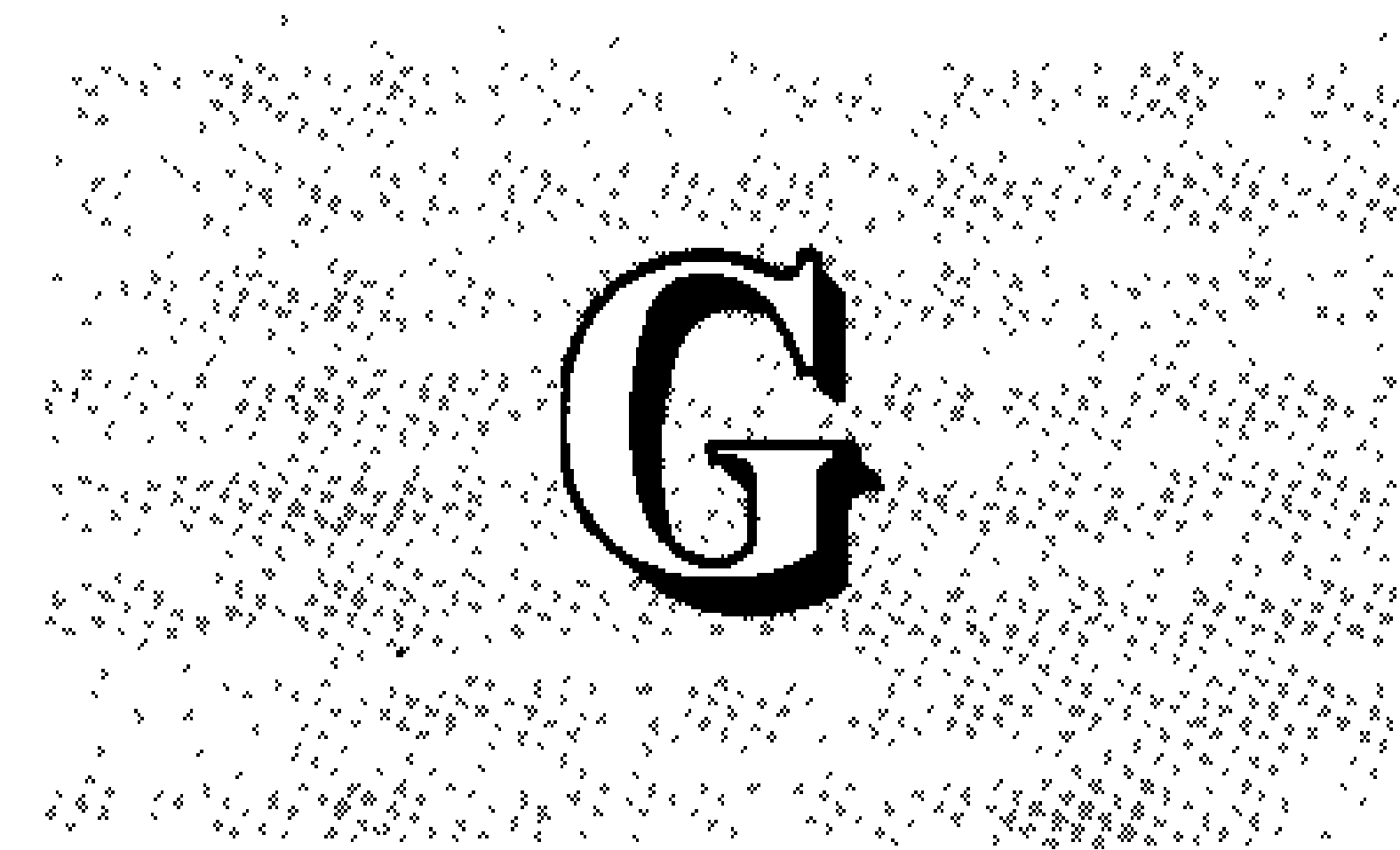
复合电压试验时，应采取必要的安全保护措施，防

止加压过程中或被试品击穿时一个电压源的电压对另一个电压源造成损坏。

参考书目

IEC Standard Publication 71-3. Insulation co-ordination. Part Ⅲ, 1982

(王 来)



ganshi bianyaqi

**干式变压器** (dry type transformer) 铁芯和绕组不浸在绝缘液体中的变压器。干式变压器采用气体或固体绝缘介质。按其不同的绝缘和冷却结构，干式变压器可分为密封型、全封闭型、封闭型、非封闭型、包封绕组型等。①密封型：具有密封的保护外壳，内部充空气或其他气体（如 SF<sub>6</sub> 气体），内部气体不与外界交换的一种非呼吸型变压器；②全封闭型：具有保护外壳但不密封，内部空气能与大气通过呼吸装置进行交换，但不用与大气循环的方式冷却内部；③封闭型：与全封闭型的不同点是内部空气与外界空气进行循环，以对流的方式冷却铁芯和绕组；④非封闭型：没有保护外壳，铁芯和绕组直接暴露在空气中；⑤包封绕组型：具有一个或几个用固体绝缘包封的绕组的变压器（如树脂浇注型变压器），一般不加保护外壳。

干式变压器温升限值表

部 位	绝缘系统温度 (℃)	最高温升 (K)	绝缘材料 耐热等级
绕组 (用电阻法测 量的平均温升)	105	60	A
	120	75	E
	130	80	B
	155	100	F
	180	125	H
	220	150	C

干式变压器的绝缘和冷却特性一般不如油浸式变压器，特别是非密封型干式变压器，其绝缘强度易受环境条件的影响，通常只能在洁净而干燥的室内使用。干式变压器的主要优点是可以避免油浸变压器事故时容易引起的着火和爆炸危险，故通常被用于地下铁道、高层建筑等对防火要求较为严格的场所。干式变压器的发展趋势主要是减小安装尺寸，防止环境对其性能的影响，提高可靠性以及扩大单台容量。目前树脂浇注型变压器和六氟化硫绝缘变压器正在逐渐取代普通的空气绝缘干式变压器。

干式变压器的温升限值与其绝缘材料的耐热等级

有关，表中列出了部分数值。对于干式变压器，在运行中必须保证任何情况下不得出现使铁芯本身、其他金属部件和相邻材料受损害的温度。

(凌 悠)

ganshiyan

**干试验** (dry test) 电力设备的外绝缘按照规定的条件在干燥和清洁的状态下进行的高电压试验。按照施加电压的不同类型分为直流干试验、交流干试验、雷电冲击干试验和操作冲击干试验；按照施加电压对被试品的不同效应分为干耐受试验和干闪络试验。干耐受试验即对被试品施加规定电压并维持一定时间而不引起破坏性放电的试验。干闪络试验即对被试品施加逐渐升高的电压直至绝缘表面发生破坏性放电的试验。干试验通常用于产品的型式试验、出厂试验和交接试验。

试验时被试品的布置应尽量与其运行情况一致，并注意使被试品与接地体或邻近物体保持足够的距离。当试验在非标准状态下进行时，对试验电压需进行大气条件修正和海拔修正。

见高压电力设备绝缘试验、交流电压试验。

(王如璋)

ganshang bianyaqi

**杆上变压器** (pole-mounted transformer)

装在电杆上的配电变压器，简称杆变。具有节约使用土地、围栏设施和安装材料等优点。

杆上变压器应安置在牢固的杆上变电台上，变电台可用角钢或其他材料制成，并固定在相应的电杆上。变电台台面距地面高度须根据变压器安全运行要求和地面情况确定，一般在安置 10 kV 变压器时须大于 2.5 m，安置 35 kV 变压器时须大于 3 m。

杆上变压器大多采用油浸式电力变压器，由于负重等问题，容量不宜过大。而且变压器单台容量过大，会使低压配电网布置困难，供电电压也难以保证，因此宜采用小容量、多台组，以缩小供电半径。中国 10 kV 配电线路装设的三相杆变，容量一般都在 800 kV·A 及以下。

杆上变压器可采用电缆进出线或架空进出线。采用架空进出线时，变压器的引下线、引上线一般采用多股铜芯或铝芯绝缘线，其截面按变压器的额定电流选择，铜芯线不小于 16 mm<sup>2</sup>，铝芯线不小于 25 mm<sup>2</sup>，以保持其必要的机械强度。安装时，为保证运行及维修安全，要求低压架空线架设 在高压架空线的下方，不可穿过两根高压引下线的间隔内。

杆上变压器的一次侧(高压侧)需装设防雷装置及

跌落式熔断器,熔断器的装设位置要便于操作,距变电台台面的高度 10 kV 时一般高于 2.5 m, 35 kV 时一般高于 3 m。杆上变压器的二次侧(低压侧)需装设低压防雷装置及低压熔断器。杆上变压器的外壳和低压绕组中性点要接地。若变压器低压绕组中性点采用不接地方式,则要在中性点上或二次侧一个相线上装设击穿保险器。

由于中国的低压配电网一般为三相四线制,故杆上变压器大多为三相电力变压器。有些国家(如美国、日本等)也有采用单相杆上变压器的,除可以低压单相供电外,也可用两台单相杆变接成 V 形接线实行三相供电。有些国家较广泛地采用了全自保护杆上变压器设备,这种设备除变压器本体外,还同时将高压熔丝、低压保护开关等保护装置装设在同一金属圆筒内,故其安装、维修方便,并具有杆上设备布置与周围环境协调及提高杆变运行的安全可靠等优点,但单台容量较小,一般在 100 kV·A 左右。

参见彩图插页第 26 页 80 图

(金辅夏)

ganshang duanluqi

杆上断路器 (pole-mounted circuit breaker)

可以安装在电杆上的断路器,通常还包括杆上负荷开关。主要用于中压架空配电线路。由于断流容量的限制,在小容量配电网中,有自动跳闸能力的杆上断路器可作为线路保护开关。在较大容量的配电网中,特别是城市配电网,杆上断路器大多作为开断和关合正常负荷电流、环流、线路或设备电容的充电电流、变压器励磁电流的线路分段开关、网络联络开关、大用户及大分支的分路开关使用,很少用作线路保护开关。

传统杆上断路器及杆上负荷开关大多为油浸式,如中国常用的 DW□-10(G)型(额定电流 30~400 A,断流容量 25~55 MV·A)杆上断路器和 FW□-10(G)型(额定电流 100~400 A)杆上负荷开关等。这类设备经多次操作后,由于油的介质强度降低,常因灭弧不良造成喷油、燃油面酿成设备及人身事故,故不少地区已停止使用杆上油断路器的跳闸机构,而改作负荷开关使用。世界各国都在逐步淘汰杆上油断路器,趋势是杆上开关设备无油化,代之以新型的固体产气、六氟化硫及真空开关,并在其内配装有可供遥控的操作机构、自动多次重合闸机构以及可以传送状态信息的通信附件,为配电自动化提供适用的设备。

(金辅夏)

ganshang geli kaiguan

杆上隔离开关 (pole-mounted disconnecting

switch) 装在电杆上部用来隔离电路的高压户外型手动操作开关,简称杆刀,俗称刀闸。为便于地面操作,其操作手柄装于离地面适当高度的电杆上,并用拉杆与其上方的传动机构相连接。杆上隔离开关的主要用途是将配电线路进行分段,利用杆上隔离开关“断开”或“合上”的不同工作状态,使各段配电线路可以按照配电网运行方式的需要进行各种连接,从而使配电网的运行更为灵活,有利于安全供电。

杆上隔离开关按其不同型式有三相联动式和单相操作式两种。三相联动式是通过操作机构实现三相同步合闸与分闸,单相操作式是用人工的方法,使用绝缘棒逐相操作。

杆上隔离开关无灭弧装置,一般不容许切断负荷电流和短路电流,但因其有一定的自然灭弧能力,故可开、合一定数量的电流以及在容许范围内进行电网解列或并网操作。1980 年中华人民共和国电力工业部颁发的《电力工业技术管理法规》中规定,杆上隔离开关可开、合励磁电流不超过 2 A 的空载变压器和电容电流不超过 5 A 的空载线路,开、合电压为 10 kV 及以下而且电流在 15 A 以下的负荷,开、合电压为 10 kV 及以下电流在 70 A 以下的环路电流。在进行这些操作前,要对实际开、合的电流进行核算,以防发生事故。

杆上隔离开关在安装或检修后,必须进行调整,方可投入运行。调整的主要项目有:闸刀与静触头位置是否对准,接触紧密度及接触压力是否足够,闸刀张角与开距是否符合要求,操作拉杆及传动机构是否灵活等。在运行中要加强巡视、检查,观察隔离开关有无放电声,夜间观察是否有电火花,操作拉杆及各焊接部位有无断裂开焊痕迹,零件有无掉落等。

(金辅夏)

gantā

杆塔 (supporting structures of transmission line; poles & towers)

支承架空输电线路导线和架空地线并使它们之间以及与大地之间保持一定距离的杆形或塔形构筑物。杆塔多数采用钢和钢筋混凝土结构,少量也采用木结构。通常对木和钢筋混凝土的杆形结构称为杆,钢的塔形结构和钢筋混凝土烟囱形结构称为塔。不带拉线的杆塔称为自立式杆塔,带拉线的杆塔称为拉线杆塔。中国在应用离心原理制作的钢筋混凝土杆以及钢筋混凝土烟囱形跨越塔方面有较为突出的成就。

输电线路杆塔有两种分类方法,一是按其不同的用途和功能划分为不同的类别,另一种是按其不同的外观形状划分为不同的型式。

杆塔类别 按其在输电线路中的用途和功能可分

为直线、耐张、转角、终端、换位、跨越六种类别的杆塔。

**直线杆塔** 支承导线、架空地线的重力以及作用于它们上面的风力，而在施工和正常运行时不承受线条张力的杆塔。导线和架空地线在直线杆塔处不开断，且被定位于导线和架空地线呈直线的线段中。直线杆塔的作用仅是线路中悬挂导线和架空地线的支承结构。

**耐张杆塔** 除支承导线和架空地线的重力和风力外，还承受这些线条张力的杆塔。导线和架空地线在耐张杆塔处开断，且被定位于导线和架空地线呈直线的线段中，用来减小线路沿纵向的连续档的长度，以便于线路施工和维修，并控制线路沿纵向杆塔可能发生串倒的范围。

**转角杆塔** 支承导线和架空地线的张力，使线路改变走向形成转角的杆塔。导线和架空地线开断直接张拉于杆塔上时称为耐张转角杆塔，导线和架空地线不开断的称为悬垂转角杆塔。

**终端杆塔** 线路起始或终止的杆塔。终端杆塔定位于变电所或升（降）压站的配电装置门型构架前，线路一侧的导线和架空地线直接张拉于终端杆塔上，而另一侧不架线或以很小的张力与门型构架相连。参见彩图插页第2页5图。

**换位杆塔** 用来改变线路中三相导线相互位置的杆塔。导线在换位杆塔上不开断时称为直线换位杆塔，反之称为耐张或转角换位杆塔。

**跨越杆塔** 用来支承导线和架空地线跨越江河、湖泊及海峡等的杆塔。导线及架空地线不直接张拉于杆塔上时称为直线跨越杆塔，直接张拉于杆塔上时称为耐张或转角跨越杆塔。为满足航运要求，跨越杆塔一般都比较。为减小杆塔承载，节省材料及降低工程造价，一般多采用直线跨越杆塔。中国在长江中下游成功地建设了多处高度在100 m 及以上的烟囱式钢筋混凝土和钢结构直线跨越杆塔，在珠江上建有目前世界最高的钢结构跨越杆塔，塔总高达235.75m，在南京长江上建有目前世界上最高的烟囱式钢筋混凝土跨越杆塔，塔总高达257 m。参见彩图插页第3页8图和第4页10图。

**杆塔型式** 按其不同的外观结构形状可分为酒杯型、猫头型、干字型、上字型、克里米亚型、悬链型等11种主要型式的铁塔，以及上字型、单柱型、门型等3种主要型式的钢筋混凝土杆和铁塔。

**酒杯型塔** 塔上架设两根架空地线，导线排列在一个水平面上，塔形呈酒杯状，如图1所示。它通常是220 kV 及以上电压等级输电线路的常用塔型，有良好的施工运行经验，特别适用于重冰区或多雷区。

**猫头型塔** 塔上架设两根架空地线，导线呈等腰三角形布置，塔型呈猫头状，如图2所示。它也是220 kV 及以上电压等级输电线路的常用塔型，有良好的施工运行经验，节省线路走廊，其经济指标较酒杯型塔稍差。

**干字型塔** 塔上架设两根架空地线，导线基本上呈等腰三角形布置，其形状如“干”字，如图3所示。这种塔型受力清晰直接，有较好的经济指标，在中国通常是220 kV 及以上电压等级输电线路的常规型塔，主要用作耐张及转角塔。

**上字型杆塔** 杆塔上只架设一根架空地线，导线呈不对称三角形布置，其外形呈“上”字形，如图4所示。它适用于轻雷及轻冰地区导线截面较小的输电线路，常用于110kV 及以下电压等级的电力线路。

**克里米亚型塔** 塔上只架设一根架空地线，导线呈不对称三角形布置，由于它首先在苏联的克里米亚地区采用而得名，如图5所示。这种塔型适用于轻雷及轻冰区，它与上字型塔相比，塔顶挠度稍有改善，一般用于110 kV 及220 kV 的输电线路。

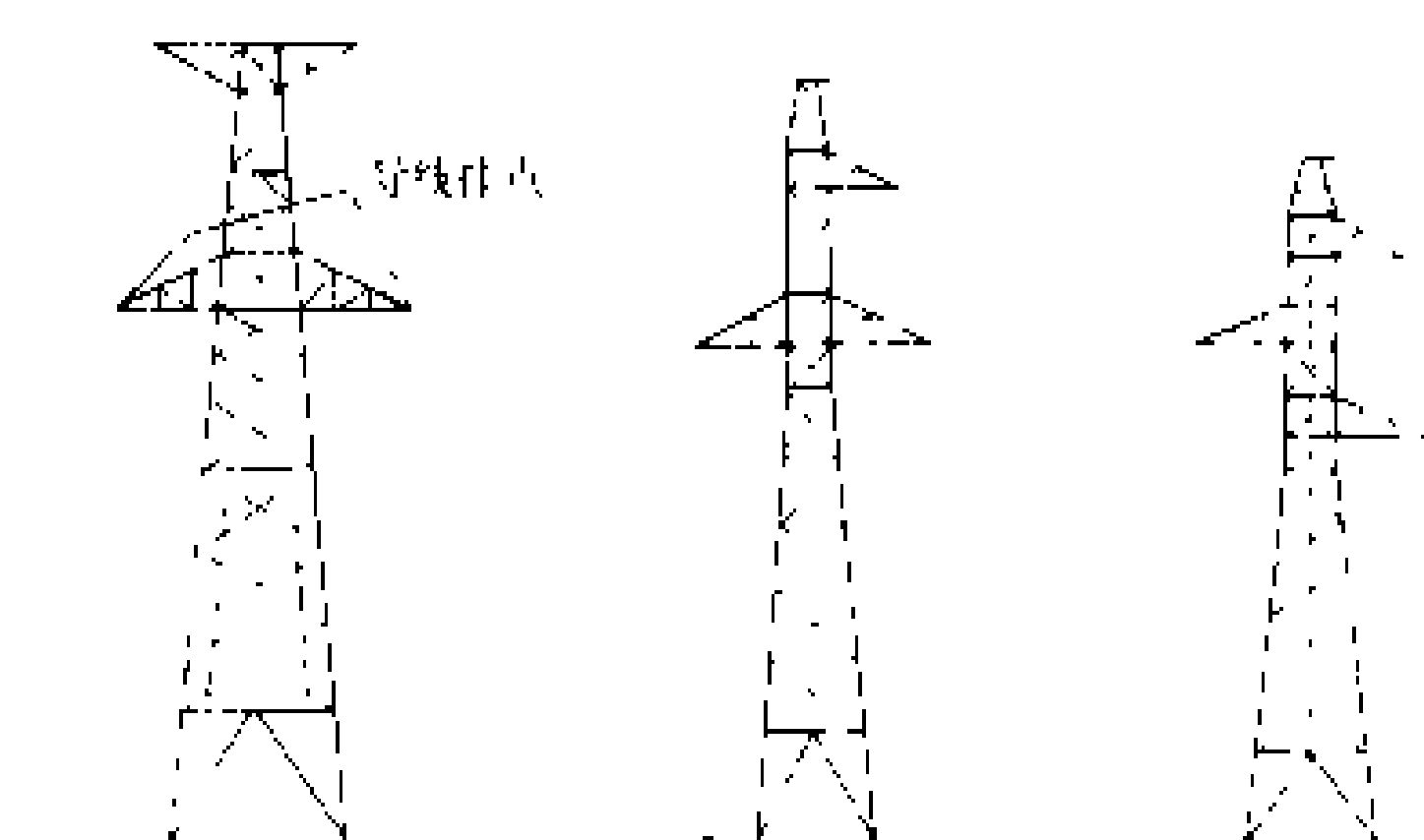


图3 干字型塔 图4 上字型杆塔 图5 克里米亚型塔

**单柱型杆塔** 用单个柱体来支持导线及架空地线的杆塔，常用于单根架空地线及导线呈三角形排列的情况，如图6所示。它适用于110 kV 及以下电压级的电力线路，常采用打拉线方式维持其稳定，具有较好的经济指标。

**门型杆塔** 用两个柱体来支持导线及架空地线的杆塔，常用于双架空地线及导线呈水平排列的情况，如图7所示。一般用于220 kV

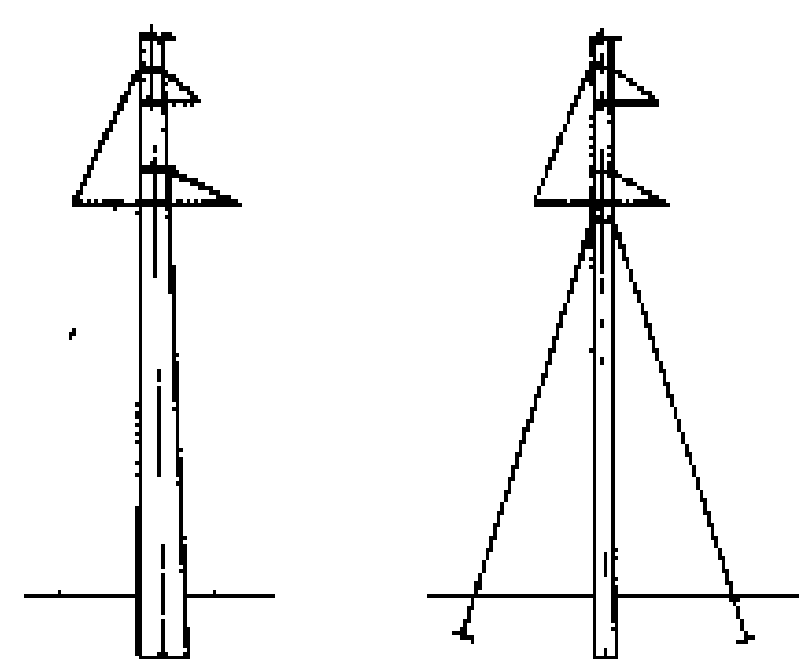


图6 单柱型杆塔

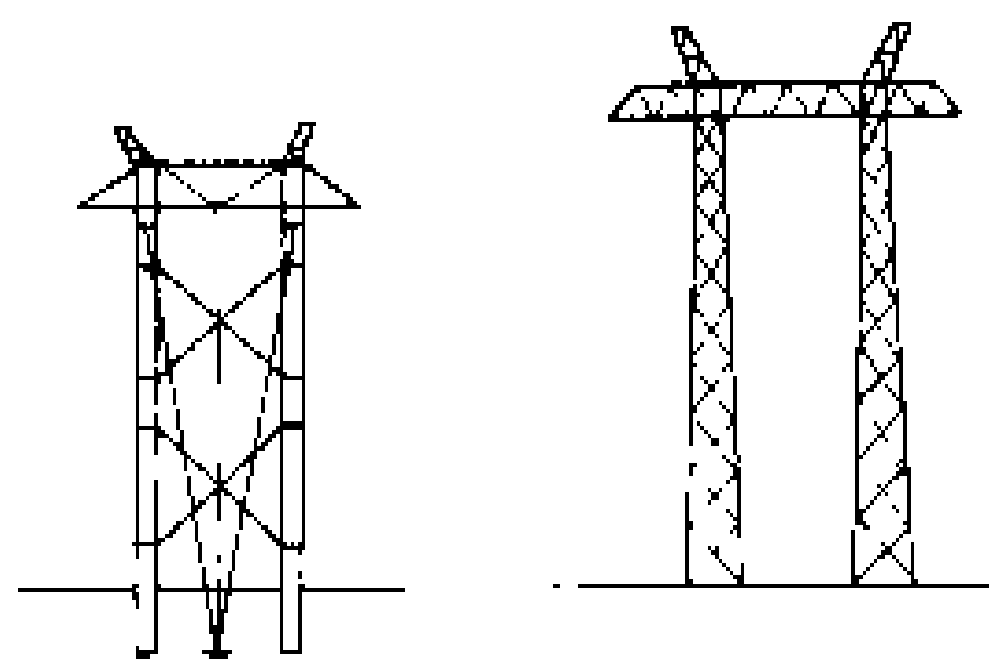


图7 门型杆塔

较大，带拉线时更具有很好的经济指标。

**拉线V型塔** 门型杆塔的特例，常用于500 kV的输电线路，在220 kV输电线路中也有少量使用，其外形如图8所示。它具有施工方便，耗钢量低于其它拉线门型塔等优点。但它占地较大，在河网及大面积机耕地区使用受到一定限制。这种塔型在国外还使用于人烟稀少的地域，便于利用直升飞机吊运和安装。参见彩图插页第5页15图。

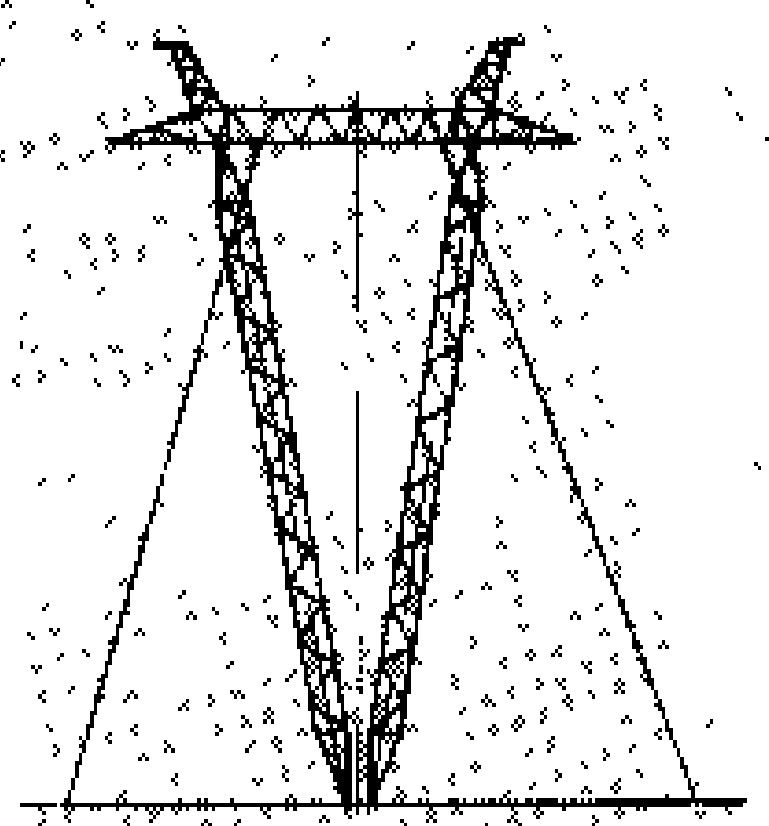


图8 拉线V型塔

**悬链塔** 这种塔型取消了传统型式的钢横担而采用钢索和绝缘子串来悬挂导线，支承结构采用两根打拉线的钢柱，改善了塔头电气间隙的布置，特别适用于500 kV及以上的超高压和特高压输电线路，其外形如图9所示。加拿大曾在500 kV和735 kV输电线路使用，并拟用于1000 kV线路中。它比常规塔型节省钢材，但占地大，故只宜用于空旷地带，同时绝缘子用量多，运行维护比较复杂。

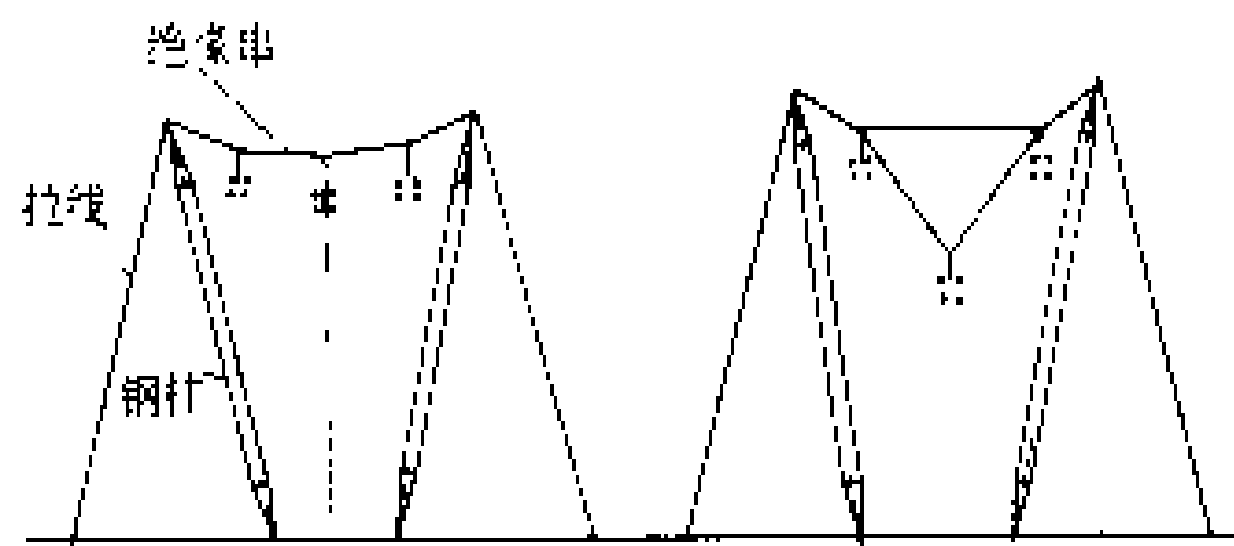


图9 悬链塔

**AII型塔** 塔正面呈“II”形，侧面呈“A”形，故得其名。通常用作纵向有较大张力的耐张或转角塔，因为侧面“A”形有较大的刚度。苏联在400~500 kV输电线路中应用的AII型塔，如图10所示。AII型塔结构较复杂，耗钢量也较

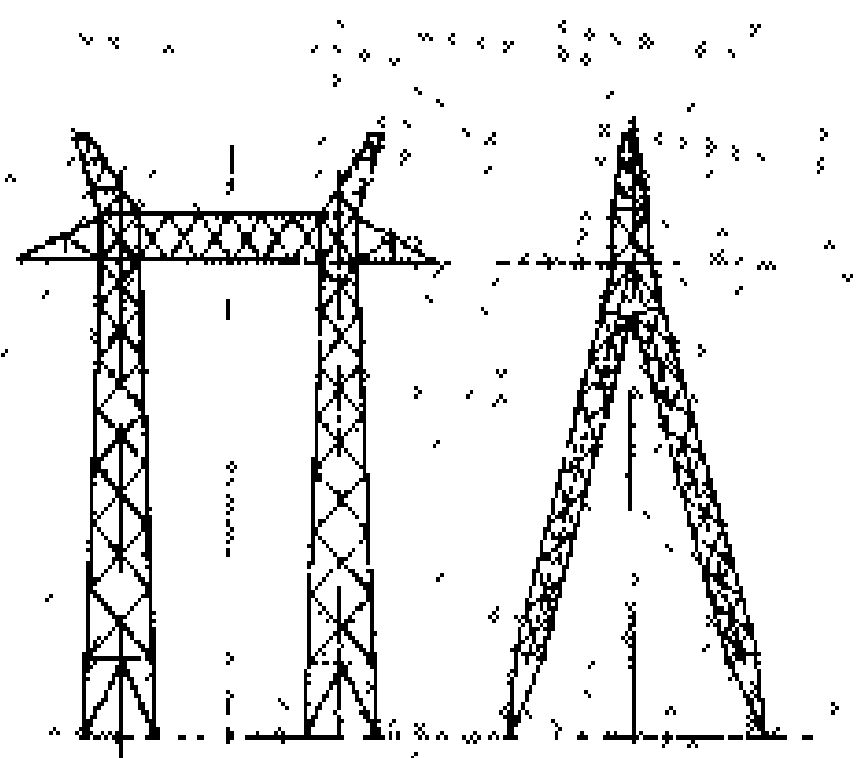


图10 AII型塔

大。

**双回路鼓型塔** 由于导线呈鼓形布置而得其名。这种塔型适用于覆冰较重地区，稍伸长的中横担使所有导线均能达到适当叉开的目的，避免导线脱冰跳跃时发生闪络事故。它是双回路铁塔常见的塔型，其外形如图11所示。

**双回路伞型塔** 由于导线呈伞形布置而得其名。这种塔型结构布置比较合理，具有较好的经济指标。它也是双回路铁塔常见的塔型，其外形如图12所示。

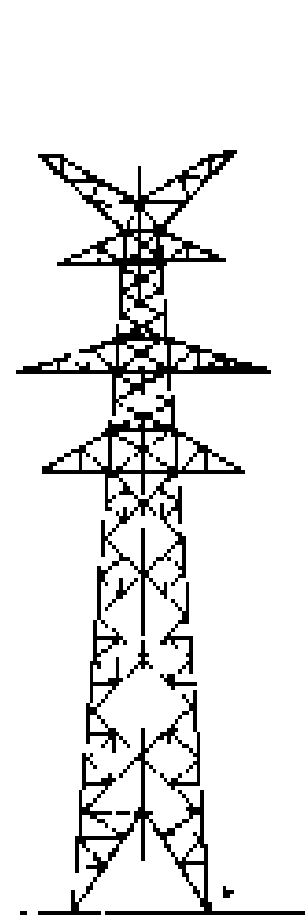


图11 双回路鼓型塔

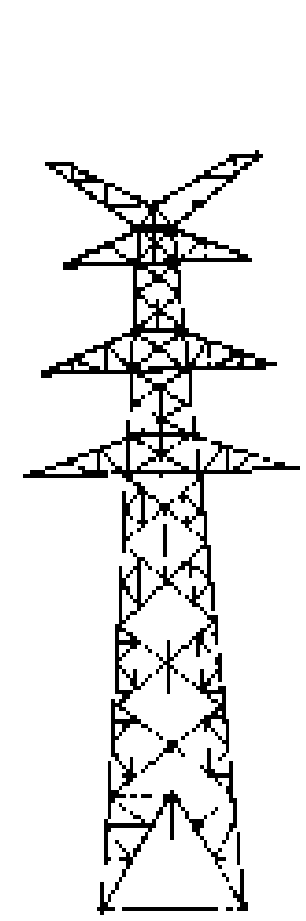


图12 双回路伞型塔

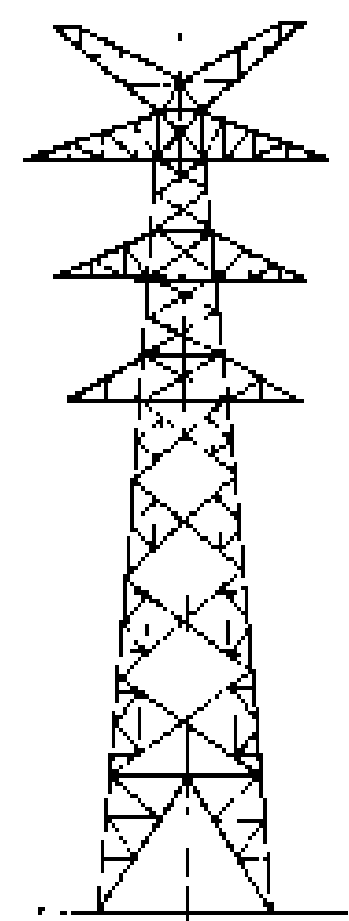


图13 双回路倒伞型塔

**双回路倒伞型塔** 由于导线呈倒伞型布置而得其名。这种塔型结构布置不甚合理，实际工程中不常采用，但它在施工及带电作业方面较其它塔型方便，其外形如图13所示。

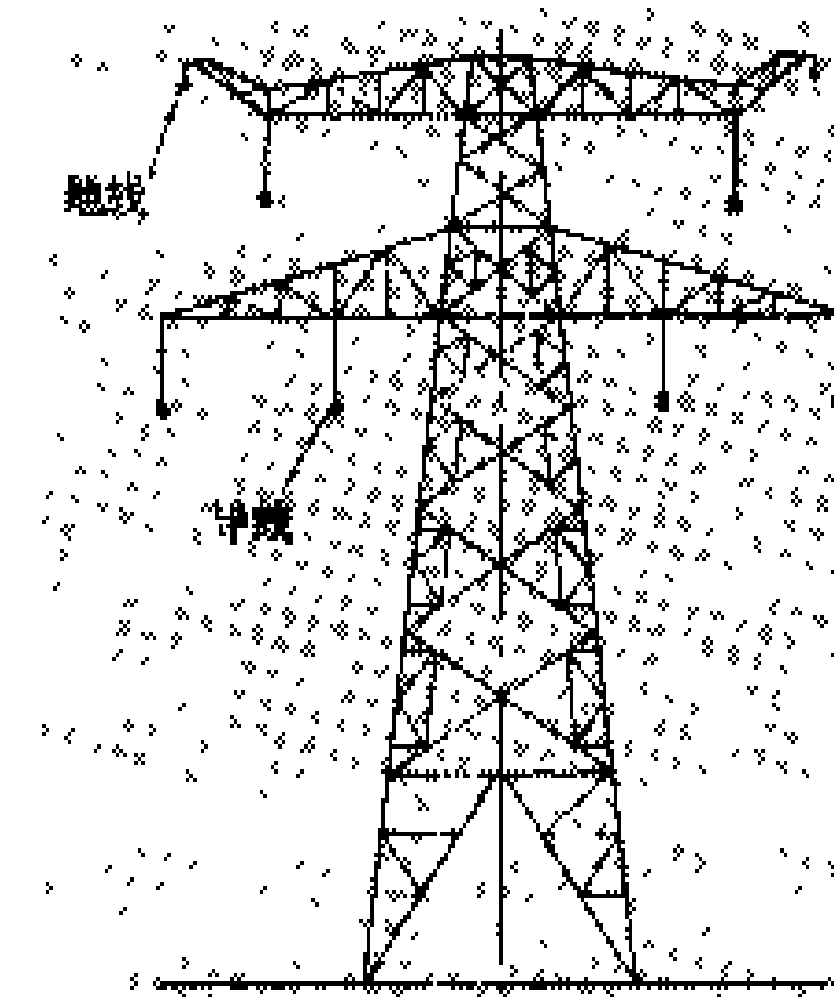


图14 双回路十字型塔

**双回路十字型塔** 导线分二层呈“干”字形布置，故得其名。这种塔型的主要优点是降低了塔高，同时因导线呈三角形排列，较垂直排列导线间的间隙大，因而对防冰害及抗导线舞动性能较好，其经济指标一般也优于其它塔型，但

需较宽的线路走廊。这种塔型常用于较高的跨越塔及空旷地段，其常规外形如图14所示。

(唐国安)

ganta jichu

**杆塔基础** (pole & tower foundation of transmission line) 用于将杆塔固定在土壤中的地下装置和杆塔自身埋于土壤中起固定作用部分的统称，有时简称为基础。杆塔基础起着将杆塔荷载传递于地基的重要作用，同时又依靠地基支承。杆塔基础通常用混凝土、钢或其他材料做成，根据工程需要，可做成各式各样的结构形式。中国架空输电线路工程中常

用的有现浇基础、装配式基础、桩式基础、岩石锚桩基础、底卡拉线盘基础等几种形式。

**现浇基础** 在埋设杆塔的位置浇制混凝土做成的基础。在混凝土原材料砂、石和水供给方便或运输条件较好的地区，常考虑采用现浇基础。现浇基础又分为底板式基础、塔腿直埋式基础和掏挖式基础三种（见图1）。

**底板式基础** 也称柱板式基础，是最常见的现浇基础，由主柱和底板二部分组成，如图1（a）所示。主柱和底板多为钢筋混凝土结构，有的主柱也采用素混凝土结构。主柱一般为直立式，也有倾斜式的。底板多为一阶的，也有二阶或多阶的。主柱与铁塔的连接多采用地脚螺栓方式，也有的采用塔腿与埋入角钢的露出部分相连接的埋入角钢方式。底板式基础的基础坑对砂土一般要作大开口的开挖，对粘土则可以只挖成垂直坑壁。浇灌混凝土时使用模板，拆除模板后需进行回填土夯实。

**塔腿直埋式基础** 一般采用素混凝土结构，塔腿一直伸到底板部，塔腿端部设有锚固材，如图1（b）所示。浇灌混凝土时使用模板，拆除模板后需进行回填土夯实。这种基础在浇灌混凝土前需预先安装最下一节塔身。

**掏挖式基础** 外形一般也是柱板式，如图1（c）所示。主柱部分挖成直壁基坑，浇灌混凝土前置入骨架。底板部分有两种情况：一种是底板全部伸入原状土，人工掏挖量大，施工时全部不需模板；另一种是底板部分伸入原状土，人工掏挖量较少，浇灌混凝土时主柱部分需用模板，拆除模板后主柱与原状土之间要进行回填土

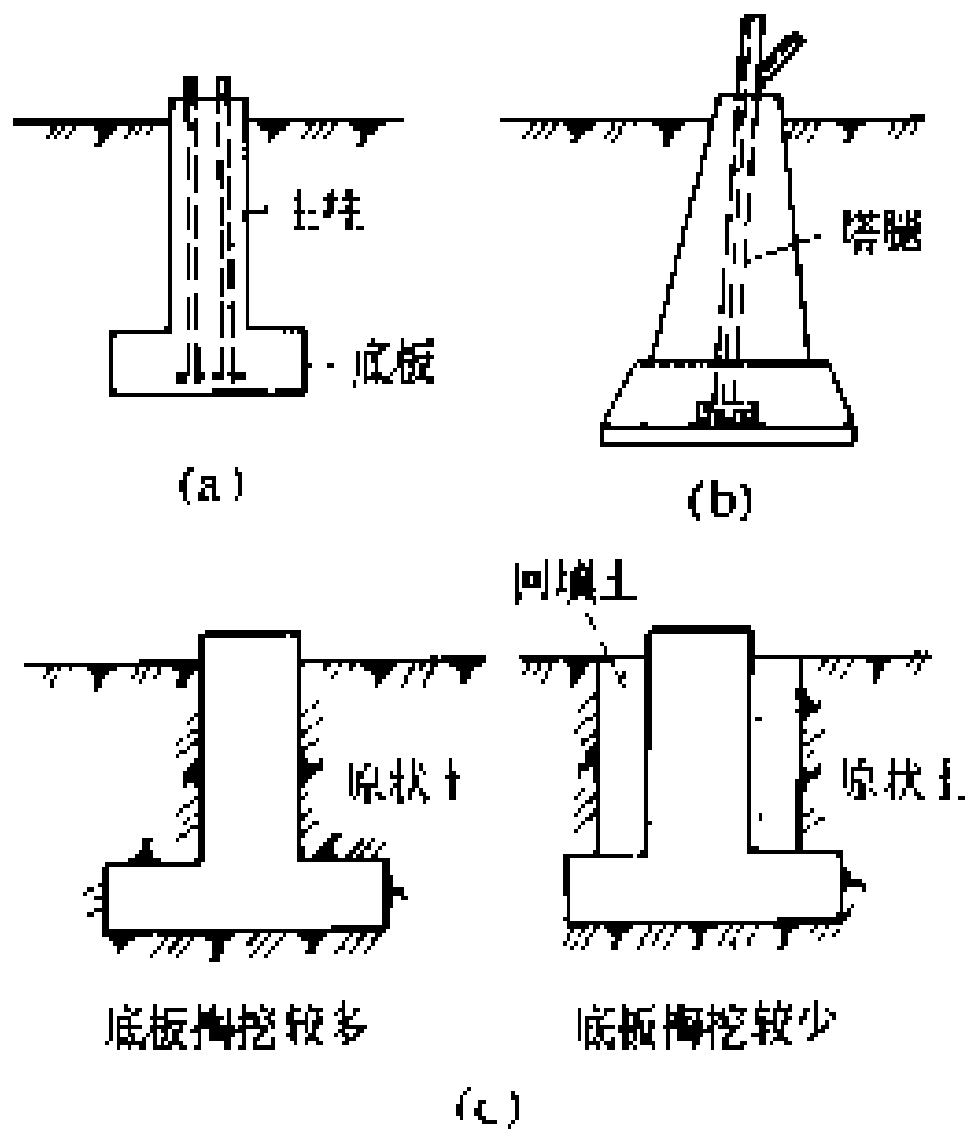


图1 现浇基础

夯实。将底板埋入原状土是使基础与原状土接触的最好方法。掏挖完毕宜随即浇灌混凝土，以保持原状土的稳定状态。掏挖式基础适用于基坑无水的粘性土中。由于掏挖式基础的底板伸入原状土，能充分发挥原状土的抗拔性能，与底板式基础相比，可节约大量混凝土。

**装配式基础** 在现场用预制的金属构件或钢筋混凝土构件装配而成的基础。对于土质较坚硬，无地下水，缺少砂、石、水且运输困难的地区，采用装配式基

础比较合适。装配式基础又有钢格栅基础、预制混凝土构件基础、金属和预制混凝土构件混合基础三种。

**钢格栅基础** 底板用金属构件拼装成网格状，俗称花窗式基础，如图2（a）所示。钢格栅基础刚度较小，一般只适用于荷载较小的直线型杆塔。钢格栅基础在施工时要有严格的回填土夯实措施。

**预制混凝土构件基础** 主柱和底板均为预制混凝土构件的基础。各构件之间均用螺栓连接。图2（b）所示为圆柱浅埋型，图2（c）所示为轨枕型。

**金属和预制混凝土构件混合基础** 由金属支架和混凝土板条底板组成的基础，如图2（d）所示。

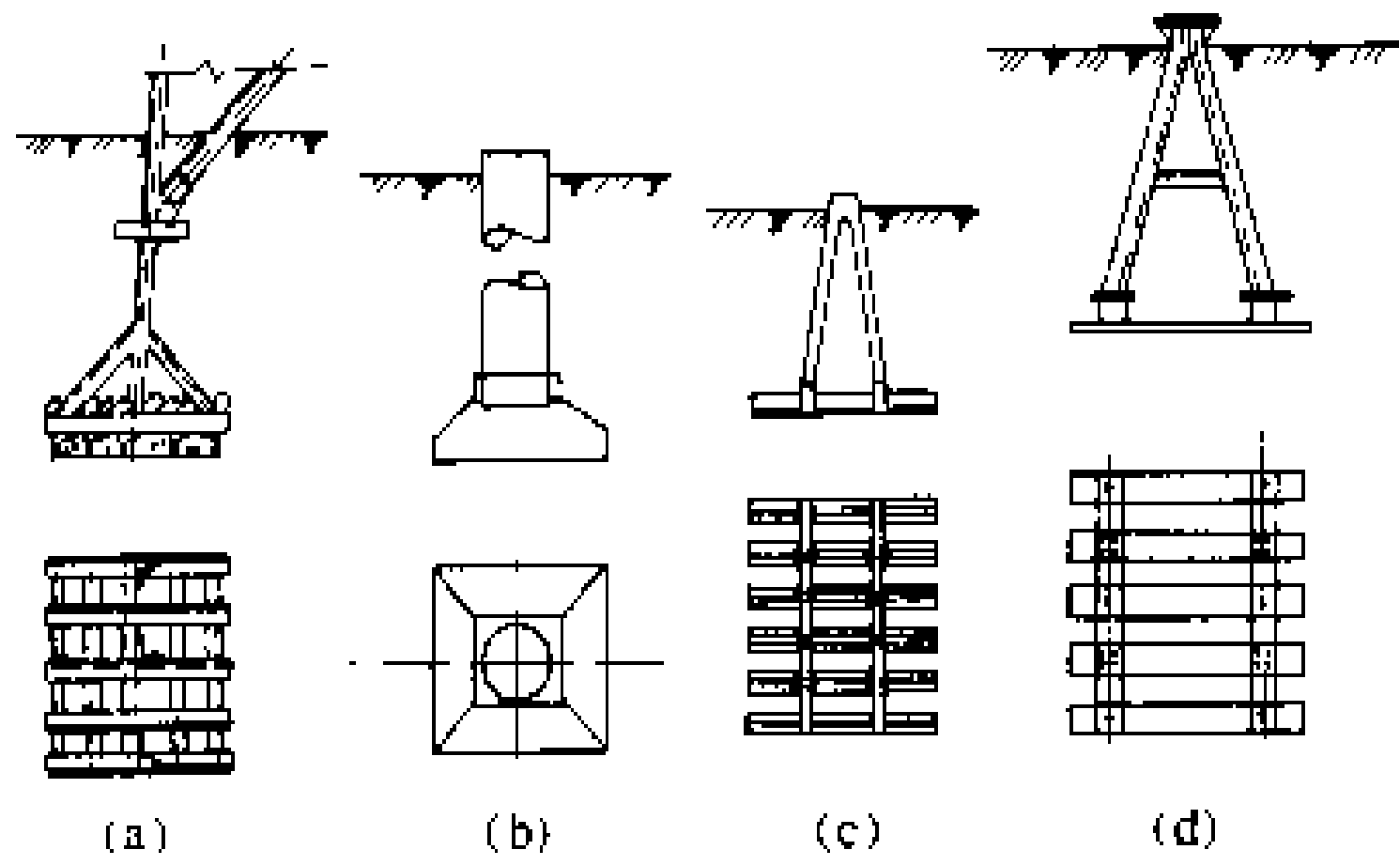


图2 装配式基础

（a）钢格栅基础；（b）圆柱浅埋型基础；（c）轨枕型基础；（d）金属和预制混凝土构件混合基础

**桩式基础** 通过桩体把荷载传递到地基上的基础。一般适用于地基软弱地区。桩式基础又分为打入桩基础、钻孔灌注桩基础和爆扩桩基础三种。

**打入桩基础** 中国主要用钢筋混凝土预制桩，采用锤打或压入等方法埋入土中。可以用单桩作为一个塔腿的基础。一般常用几根桩组成的群桩，并在其上浇制混凝土承台，使群桩连成整体以承受较大的荷载。

**钻孔灌注桩基础** 将桩身的钢筋骨架置入预先钻成或冲击成型的孔内然后灌注混凝土的基础。在中国，过去对位于软弱地基的跨越高塔使用钻孔灌注桩深基础（见图3），并用承台连接群桩。目前桩径2~2.5m、埋深50~60m的钻孔灌注桩已较普遍。钻孔灌注桩基础具有节约原材料，缩短施工工期，降低工程造价等许多优点。

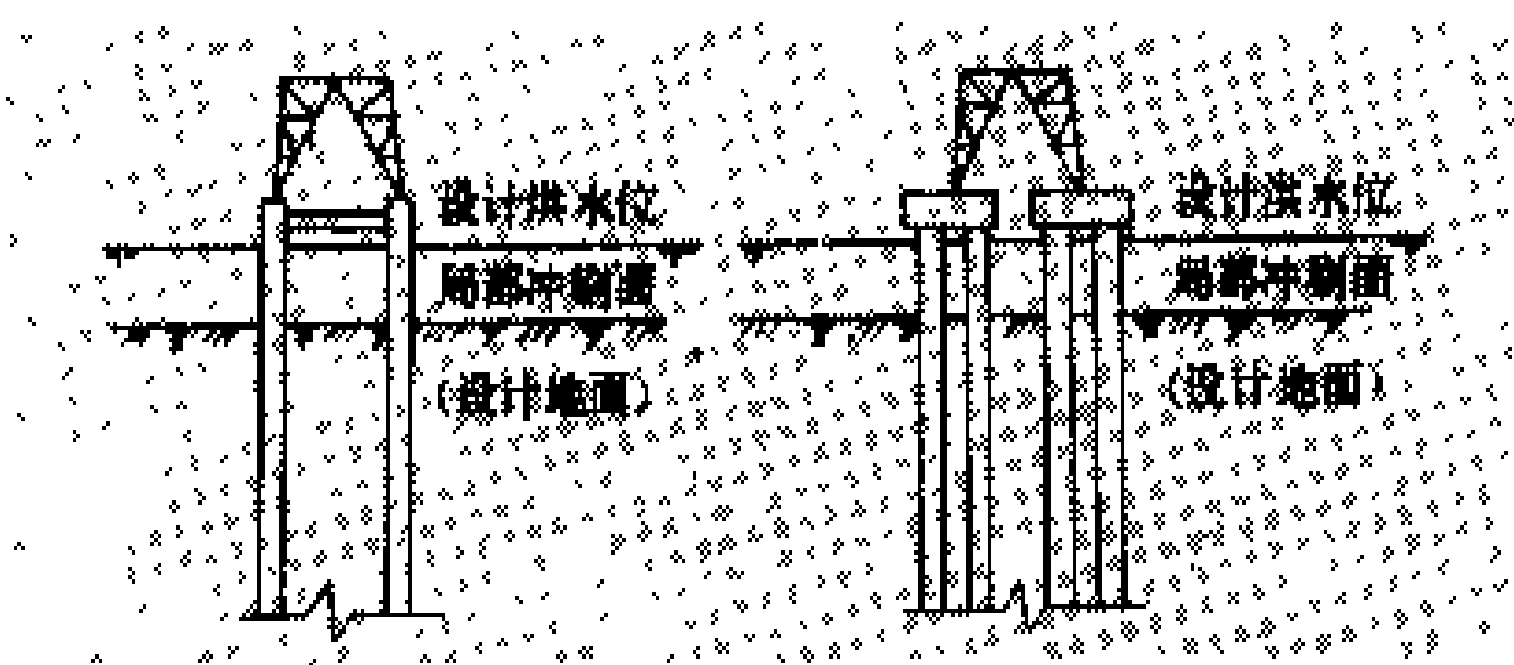


图3 钻孔灌注桩深基础

**爆扩桩基础** 先用轻便机具钻成小孔，下放炸药管，然后引爆炸药扩大成预期的圆筒孔。如需扩大底

部,往往需进行二次爆扩,待最后土胎成型,放入钢筋骨架,再灌注混凝土。这种基础适用于可以爆扩成型的硬塑和可塑状态的粘性土中,在密砂土和碎石土中也可采用。

**岩石锚桩基础** 通过水泥砂浆或掺以化学胶结物的砂浆灌注到预先钻成的岩孔内,使拉筋与岩体结成整体以承受荷载的基础。浅锚桩基础可用重力法灌注砂浆,深锚桩基础常借助压力灌注砂浆。岩石锚桩基础的破坏要考虑到拉筋的强度,拉筋与砂浆间的粘着强度,浆柱与岩石间的粘着力及岩体剪切破坏强度。根据岩石的坚固性、风化程度和荷载条件,岩石锚桩基础通常可分为直锚式、承台式及嵌固式三种,见图4。

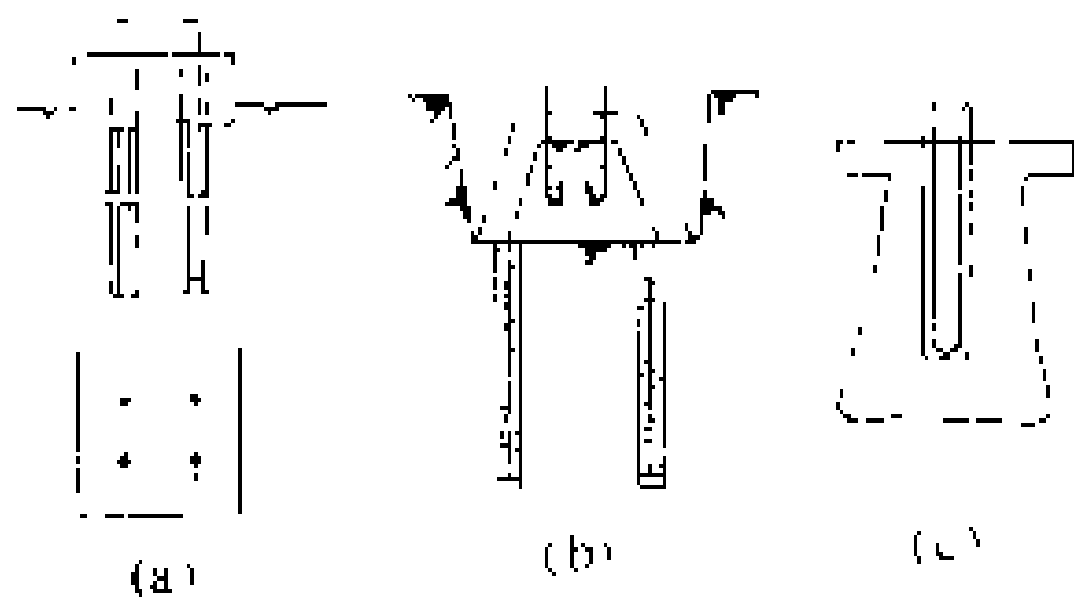


图4 岩石锚桩基础  
(a) 直锚式; (b) 承台式; (c) 嵌固式

**底卡拉线盘基础** 钢筋混凝土杆的底盘或底盎与卡盘连同杆身的埋地部分形成的基础。它们都是钢筋混凝土制成品。底盘是埋于电杆底部的方形或圆形盘,承受电杆的下压力并将其传递到地基上,如图5(a)所示。卡盘是紧贴于杆身埋地部分的长形横盘,用圆弧形的钢板条借助螺栓与电杆连接,用于承受混凝土杆的横向力,并将其传递到侧面土壤,如图5(b)所示。拉线盘是埋置于土中的钢筋混凝土长方形盘,中部设一吊环与拉线连接金具相连接,用以承受拉线拉力,是拉线的锚固基础,如图5(c)所示。

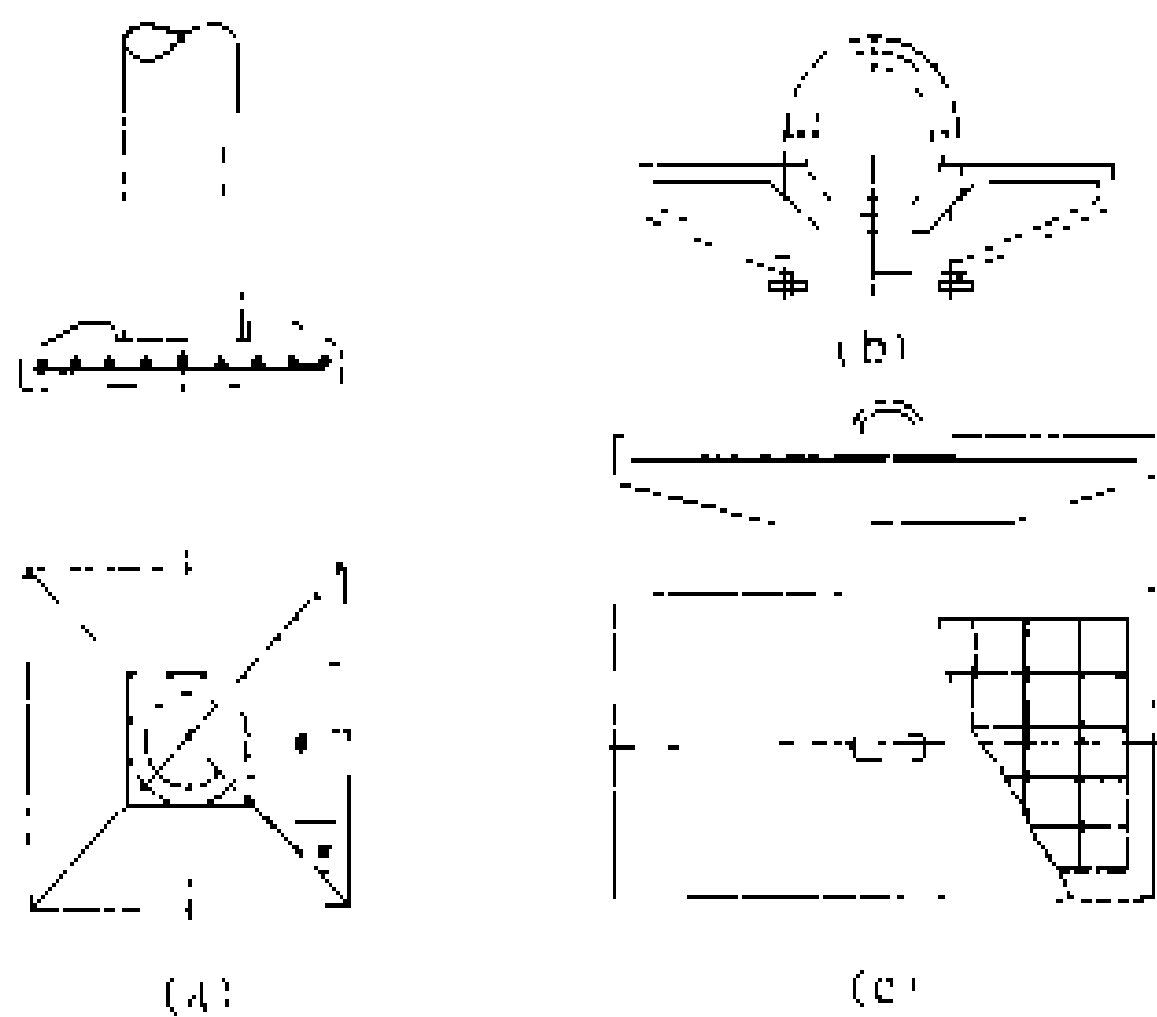


图5 底卡拉线盘基础  
(a) 底盘基础; (b) 卡盘基础; (c) 拉线盘基础

**现状及发展趋势** 由于世界各国情况不同,采用的基础类型是多样化的。传统的底板式现浇基础在多数国家中仍在使用。不少的欧美国家及日本在直线型杆塔中广泛沿用钢格栅和钢压板基础。多数国家的现

浇基础大都采用随主材倾斜插入的斜柱式。法国则常采用多阶偏心式现浇基础。苏联则一直大量采用装配式钢筋混凝土基础,个别情况下采用三角架式或钢格栅式基础。瑞典盛产木材,常用枕木格栅代替钢格栅底板。美国也有用钢压板代替钢格栅底板的趋向。

钻孔桩基础在美国、加拿大等国使用非常广泛。据美国电力研究所调查,近十余年来新建和升压改造的线路中,使用直筒式和扩底式钻孔桩基础占全部基础的2/3。苏联在第一条400 kV古莫线直线型杆塔中已大量使用钻孔桩基础。日本随着铁塔的大型化,对地基较好的地区或山岳地带的大型铁塔也采用大直径的钻孔桩基础。

钢格栅基础在美国、加拿大、日本等国仍受欢迎,其优点是单件重量轻,运输方便,造价低廉。钢格栅基础易于规范化、市场化,并可与铁塔同时订货。其缺点是上拔承载力受格栅影响大,不如整块底板好,如果能改进夯实技术则可以增大其抗拔力。

土壤地锚在加拿大、美国等国有所发展,被广泛用作拉线杆塔的拉线锚固基础。土壤地锚适用于好土层,即使表层是弱土而深层是好土,也可穿透弱土层借助深层好土的阻力以增大其承载力。加拿大、美国使用的几种典型地锚有灌浆地锚、螺旋片地锚。在加拿大,受拉地锚的上段外面套有圆筒,在筒中灌浆,亦可兼受压力作为铁塔的基础,从而使土壤地锚有更开阔的发展前途。

(黄文华 江礼瑞)

ganta jichu sheji

**杆塔基础设计** (foundation design for pole & tower)

在已知地质及荷载等条件下通过一系列计算来选择合适的杆塔基础类型,确定最佳尺寸的全过程。杆塔基础设计的重要内容是要在一定的经济条件下,赋予杆塔基础结构最高的可靠度。这种可靠度,是相对于杆塔基础结构极限状态而言的。中国建筑设计标准中将极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。对杆塔基础设计而言,承载能力极限状态对应于地基的强度和稳定度,正常使用极限状态对应于地基的变位。在地基基础设计规范中,通常已将地基的强度和变位结合统一考虑,以满足两种极限状态的要求。在特殊情况下,如松软地基的特高塔基础,设计时尚需增加对沉降和位移量的核算。杆塔基础设计的主要设计荷载一般包括竖向力(即上拔力和下压力)、横向水平力及纵向水平力等,相应的计算内容有基础上拔稳定、下压稳定、倾复稳定和自身强度四项。

基础上拔稳定计算 杆塔基础抵抗上拔荷载的能



力的计算。中国有土重法、剪切法、承压法等不同的极限上拔力计算方法。

(1) 土重法。对底板式基础,假定上拔时土壤沿截头锥面破坏。极限上拔力 $T_u$ 由上拔锥体中的土重和基础自重共同平衡,见图1(a)。图中 $\alpha$ 角是假想上拔锥体的边与垂直线间的夹角。

(2) 剪切法。对扩底钻孔桩基础,根据原状土的固结状态,假定上拔时土壤呈弧形剪切面破坏。极限上拔力 $T_u$ 由下列三种抗拔力共同平衡:①与土壤凝聚力、基础形状、基础高底比因素有关的抗拔力;②与土壤容重、土壤内摩阻角、基础形状、基础高底比因素有关的抗拔力;③基础自重,见图1(b)。

(3) 承压法。对爆扩桩基础,上拔时考虑扩大头顶端深度处抗拔土体的极限承载力的支承作用。极限上拔力 $T_u$ 由扩大头顶端深度处土壤的极限承载力、桩身摩阻力、基础自重共同平衡,见图1(c)。

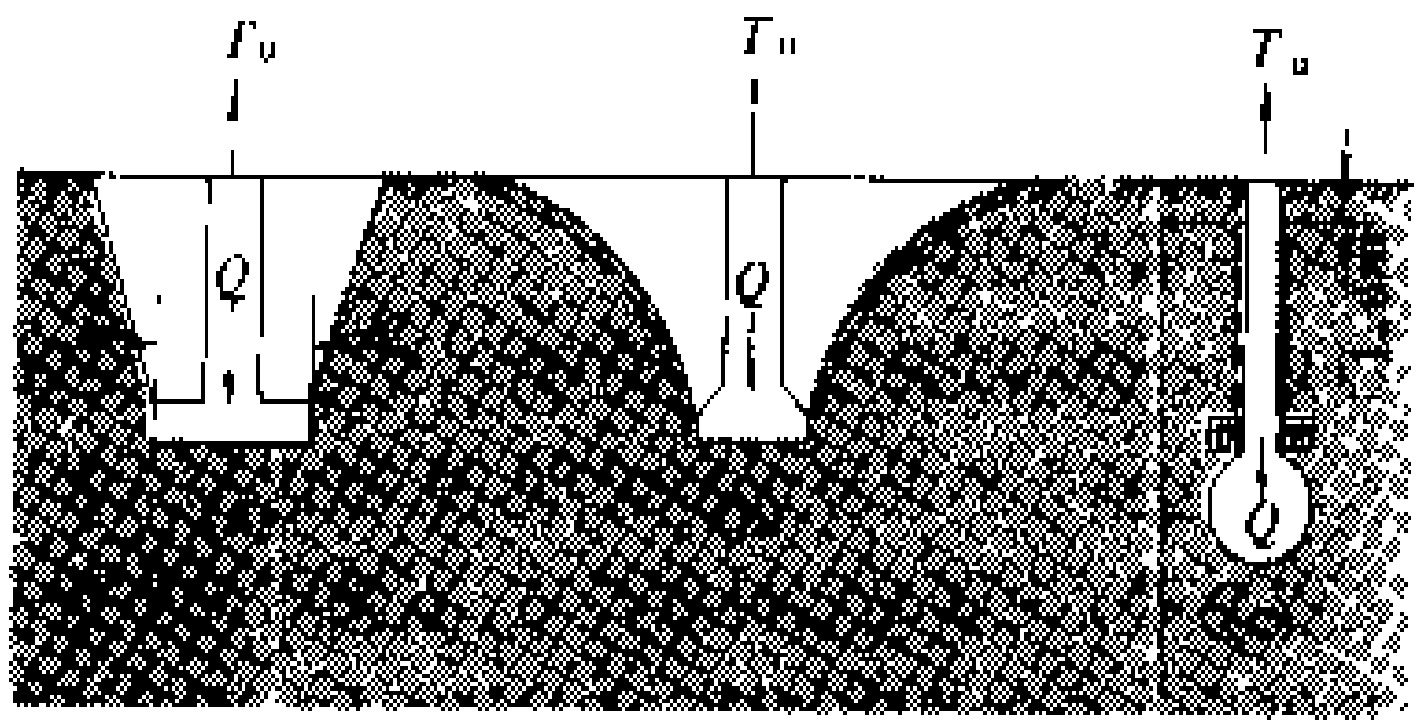


图1 基础抗拔稳定计算简图  
(a) 土重法; (b) 剪切法; (c) 承压法

上述三种极限上拔力计算中,对基础自重须乘以增大系数,对于不同土质、施工条件、基础尺寸、荷载组合等多种因素,在有关技术规定中均列有使用范围和条件。

基础倾复稳定计算 杆塔基础抵抗倾复力矩荷载的能力的计算。

受水平横向或纵向为主的荷载作用时,在地基受影响范围内,要求基础两侧被动土抗力产生的平衡力矩能保持基础的倾复稳定,并达到规定的倾复稳定安全系数。图2(a)、

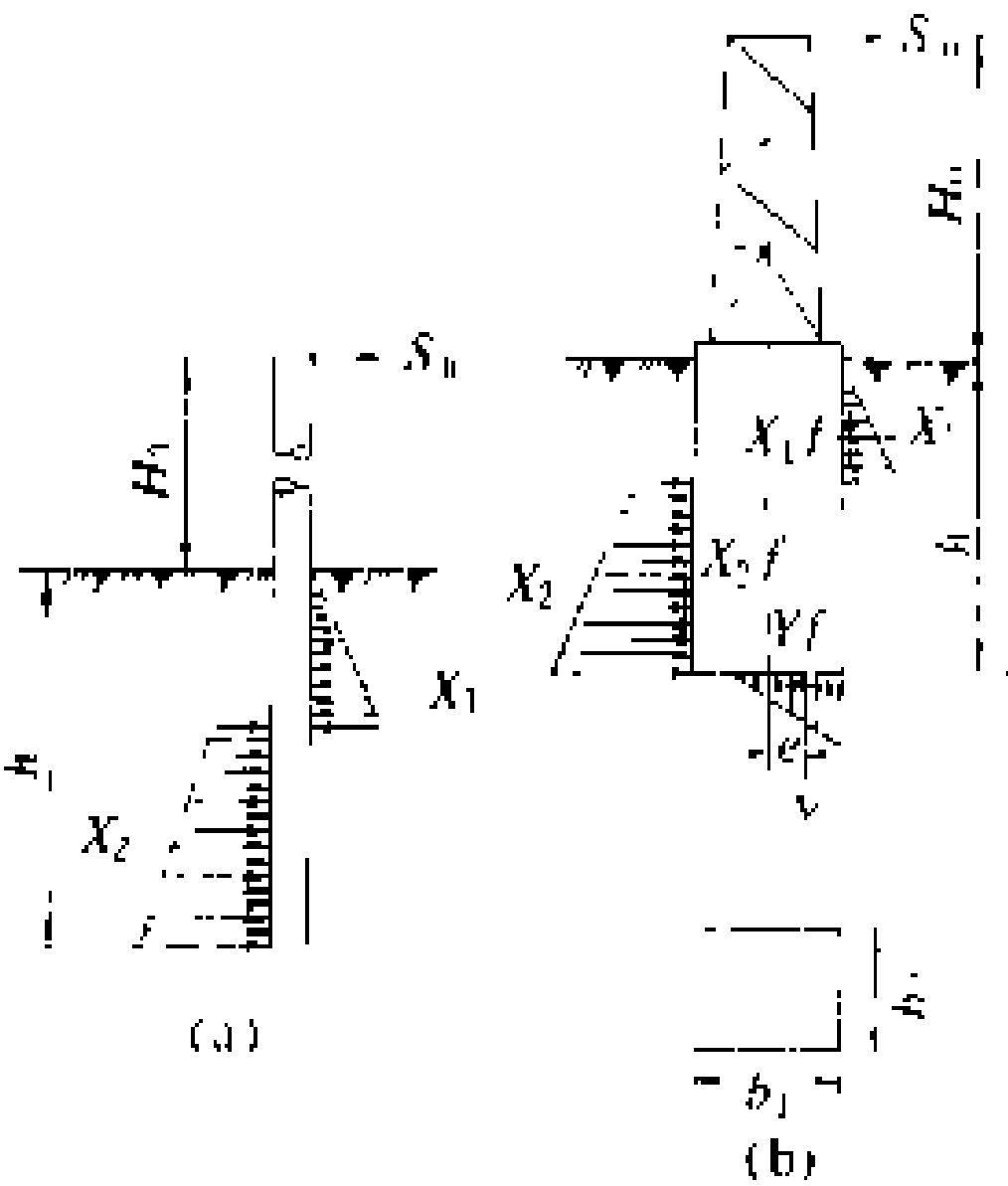


图2 基础倾复计算简图  
(a) 混凝土杆; (b) 窄基铁塔

(b) 分别为混凝土杆、窄基铁塔的倾复稳定计算简图,其中 $S_u$ 为极限倾复力, $X_1$ 、 $X_2$ 各为基础两侧被动土抗力的合力, $f$ 为基础与土壤间

的摩阻系数, $H_u$ 为倾复力作用高度, $h$ 为基础埋深。

基础下压稳定计算 杆塔基础承受下压荷载的能力的计算。基础受最大下压设计荷载作用时,要求基础底板下的地基应力不超过允许承载力。限制地基应力可保证地基土不会发生剪切破坏而失去稳定。计算松软地基在下压荷载作用范围内的地基应力,并据以算出地基的变形值,从而鉴定是否影响上部杆塔的正常使用,以及是否需要改变基础的类型。四腿铁塔各腿间的相对变位量比单腿的绝对变位量更为重要。当各腿持力层强弱显然有不同并引起过大相对变位量时,可增加铁塔结构部分构件的裕度,必要时采用整体基础或连梁基础。

基础本体强度计算 基础本体强度是保证外荷载通过基础传递至地基的必要条件。基础本体各个截面和部位以及与杆塔的连接强度都必须可靠。计算基础本体强度是以基础本身作为结构构件进行的,它和一般构筑物的结构(如钢结构、钢筋混凝土结构)的计算类似,一般均可参照建筑结构规范进行,并保证达到规定的安全系数。

发展现状 自20世纪70年代以来,由于施工技术、土壤测试技术、基础试验研究工作以及岩土力学理论的发展,促使杆塔基础设计方法不断更新。①在底板式基础上拔力的计算理论方面,世界各国通过各自的试验,发现土体破坏面各有不同的几何形状,从而发展了浅基小锥角破裂面剪切法、深基回环滑动剪切法、圆弧破裂面剪切法、对数螺旋线破裂面剪切法以及近似截头锥破裂面剪切法等许多新的计算方法。应用这些不同的计算方法,计算结果相差较大,对于某种给定的土质条件,究竟采用哪种方法比较合适,目前尚无统一认识。一般认为,圆弧破裂面剪切法、对数螺旋线破裂面剪切法或近似截头锥破裂面剪切法比较适用于考虑摩阻力的各种砂土中的基础,而传统的土重法则比较保守。②在钻孔桩基础设计中,研究极限抗拔力和极限水平方向承载力方面,美国、加拿大等国都有许多成果。上拔力计算方面,对直筒式钻孔桩,主要采用圆柱破坏面法,也有采用圆弧破坏面法或截头锥破坏面法。计算基础侧面摩阻力时,在粘性土中用附着力理论,在砂土用土压力理论。对扩底式钻孔桩,考虑扩底部分支承力,有采用承压力的理论。由于受拉时土壤特性较为复杂,故目前对极限抗拔力尚无一种严密的求解方法,而是提出一系列的系数和经验数据来计算。水平承载能力方面,对直筒式和扩底式、长桩和短桩,在不同性质的多层土壤中,在桩和土壤之间出现弹性、弹塑性以及极限塑性各阶段时,提出多种分析模型,利用程序计算,精确度高,非常简便。

(黄文华 江礼璘)

## 杆塔基础施工 (construction for pole & tower foundations)

架空输电线路施工中将杆塔基础稳固于地基上的施工工序。通常包括土石方工程和基础工程两部分。

**土石方工程** 包括土方开挖与回填、岩石爆破两方面的内容。

**土方开挖与回填** 较松干的土,一般采用人工或机械开挖;坚硬干土及冻土,优先采用机械或爆破法施工;泥水、流沙坑,则采用排水法或人工降低地下水位法施工。

挖土机械通常以小型挖土机为主,如反铲、抓铲挖土机,多斗挖沟机,推土机等;人工降低地下水位常用井点排水方法,即利用抽水设备不断从预先埋设的滤水管(井)中抽水,使地下水位降落并保持在坑底以下。

回填土应有足够的强度、密实度和稳定性。为此,应做到:①正确选择回填土料,并使回填土有适宜的含水率;②合理选择夯实工具和方法;③在地面上设置防沉层,并按规定设置边坡或护坡。

**岩石爆破** 利用炸药引爆后产生的高温高压气体,使周围的岩石破碎。它是开挖岩石基坑的最常用的有效方法。

**爆破器材** 包括炸药和起爆器材。炸药一般采用铵类炸药;起爆器材分为火花起爆和电气起爆两类。电气起爆安全可靠,又可同时起爆多个炸药包,应用较广泛。

**爆破方法** 主要有炮眼法、药壶法、定向爆破法三种。①炮眼法适用于直径为25~46 mm、深度为0.5~5 m的钻孔,装入延长药包进行爆破,是目前应用最广泛的爆破方法;②药壶法又称葫芦炮,在主药包未装入炮眼前,先用少量炸药将炮眼底部爆扩成药壶形,然后再爆主药包,常用于爆破坚硬程度小于次坚石的土石;③定向爆破法是利用岩石在爆破时,沿着最小抵抗线的方向抛掷的原理,将大量土石按指定方位堆积成一定形状的填方,它主要用于开挖施工基面。

**基础工程** 不同类型的杆塔基础,施工时的基础工程具体内容也不同。

**现浇基础施工** 通常包括模板及钢筋制作安装、基础操平找正、混凝土浇注及养护等工作。

(1)模板制作安装。常用的模板材料有木模、竹模、钢模、钢丝网水泥模及利用坚实坑壁做成的土胎模板等。模板结构由模板本体及支撑系统组成。

(2)钢筋制作安装。通常包括冷拉、冷拔、调直、除锈、划线、剪切、弯钩、绑扎、焊接等程序。底板钢筋一般采用现场绑扎;主柱及梁则采用预制安装。

(3)基础操平找正。为了保证基础的方位、各部标

高、尺寸等符合设计要求,在混凝土浇注前,模板及钢筋的安装需要操平找正。

(4)混凝土浇注及养护。一般采用机械搅拌及振捣的方法浇注。有条件的地段,可设置集中搅拌站,将混凝土拌和物分送至各个塔基。对缺水、山区等养护条件较困难的塔基,可用喷涂养护剂等方法代替洒水养护。

**装配式基础施工** 将基础构件在工厂集中预制或加工后,运至塔位进行组合安装。这类基础主要有金属和混凝土两类。

(1)金属装配式基础施工。金属基础由型钢组合而成。首先按设计要求对基坑进行处理和整平,然后进行金属构件组装、操平找正、基坑回填等工作。

(2)预制混凝土装配式基础施工。一般采取分段组装方法,即先装底盘,后装主柱。也可将底盘和主柱在地面组装好后,整体吊入基础坑内。对预制混凝土砌块式基础,则应待砌缝砂浆达到一定强度后,再浇注主柱。砌块宜用机械吊装。

**桩式基础施工** 常用桩式基础有打入桩基础、钻孔桩基础和爆扩桩基础三种。

(1)打入桩基础施工。常用的打入桩有木桩和钢筋混凝土桩(包括方形及环形断面)两种。桩的打入方法,除人工打桩外,大多采用机械打桩。机械打桩方法有:以卷扬机为动力的落锤打桩、柴油锤打桩、振动沉桩、射水沉桩等。锤击方式一般采用“重锤低击”。

(2)钻孔桩基础施工。常用钻孔机械有冲击式、冲抓式、旋转式和潜水式等多种。施工内容包括钻孔、清孔、钢筋制作安装和灌注混凝土等。①钻孔:除小直径桩( $\phi 200 \sim 400$  mm)可用人工钻孔外,尽量采用机械钻孔;水下钻孔宜采用泥浆护壁。②清孔:干坑应利用专用工具清除孔底浮土;水坑则常用缓浆法降低孔底沉淀和稀释泥浆。③钢筋制作安装:除大型钢筋骨架宜就地制作外,一般采用集中加工;安装时,在孔内加设导向装置;操平找正后,即速灌注混凝土。④灌注混凝土:干孔,可通过串筒直接灌注;水坑则利用导管,按水下灌注法施工。

(3)爆扩桩基础施工。爆扩桩基础系采用爆破手段施工的一种较特殊的桩式基础。施工方法有一次成型和两次成型两种。①一次成型:在钻成立柱导孔后,将炸药包装入导孔底,再沿导孔全长放入药包,起爆后形成桩柱孔并扩大底部孔隙,然后安装钢筋骨架、底脚螺栓和灌注混凝土;②两次成型:先用机钻或爆扩方法形成柱孔,再在孔底放入集中药包,孔内灌适量混凝土,起爆后孔底扩大成孔隙,混凝土随即落入孔隙底部,接着安装钢筋骨架、底脚螺栓和灌注混凝土。

**掏挖式基础施工** 分为挖坑和灌注混凝土两个部分。

(1) 挖坑。除采用人工或机械开挖外,对粘土类土质,也可利用爆扩(或爆破)成型后人工修理的方法进行。爆扩应避免对原土质结构的破坏。

(2) 灌注混凝土。露出地面的柱体部分可支小模板灌注。坑内浇注应由中间向四壁扩展,且宜用坍落度较大的混凝土,以利于振捣和防止泥土混入。

**岩石锚桩基础施工** 根据岩石性质及风化程度等的不同,岩石锚桩基础一般有直锚式、承台式及嵌固式三种。各类岩石基础的施工程序通常包括:清理施工基础、打锚孔(或锚筋孔)、安装底脚螺栓(或锚筋)、灌注水泥砂浆(或混凝土)。对承台式岩石锚桩基础,待水泥砂浆达到一定强度后,再进行承台部分的施工。清理施工基面要达到完全暴露岩石层的要求。嵌固式岩石锚桩基础用爆破法开挖时应采用松动药包。安装找正底脚螺栓或锚筋时应用样板进行固定。灌注水泥砂浆或混凝土后须加强养护。

**发展现状** 杆塔基础施工现场分散,又受多变的地形、地质、运输等条件影响,难以完全摆脱笨重的体力劳动,使得杆塔基础施工成为整个输电线路施工的薄弱环节。世界各国一方面都在推广和发展更经济合理的不破坏原状土的基础,如钻孔桩基础、钻扩桩基础、岩石锚桩基础、掏挖式基础、金属钻杆式基础等;另外,在施工方面,主要是大力推广并提高机械化施工水平。为解决运输困难地段的施工问题,不少国家仍然采用金属装配式基础。对现浇基础,除采用集中搅拌站外,还较多地使用塔腿直埋式基础,将塔身与塔腿一起组装后再浇注混凝土。

参考书目

潘雪荣. 高压送电线路基础施工. 北京: 水利电力出版社, 1986

(潘雪荣)

ganta jichu shigong juju

杆塔基础施工机具 (tools & machines for construction of pole & tower foundations)

重要的杆塔基础施工专用机械有挖掘机、钻扩机、凿岩机、夯实机等。

**挖掘机** 用于一般土壤条件下现

浇基础的开挖。常采用斗容  $0.5\text{ m}^3$  以下的轮胎式单斗

液压挖掘机,其结

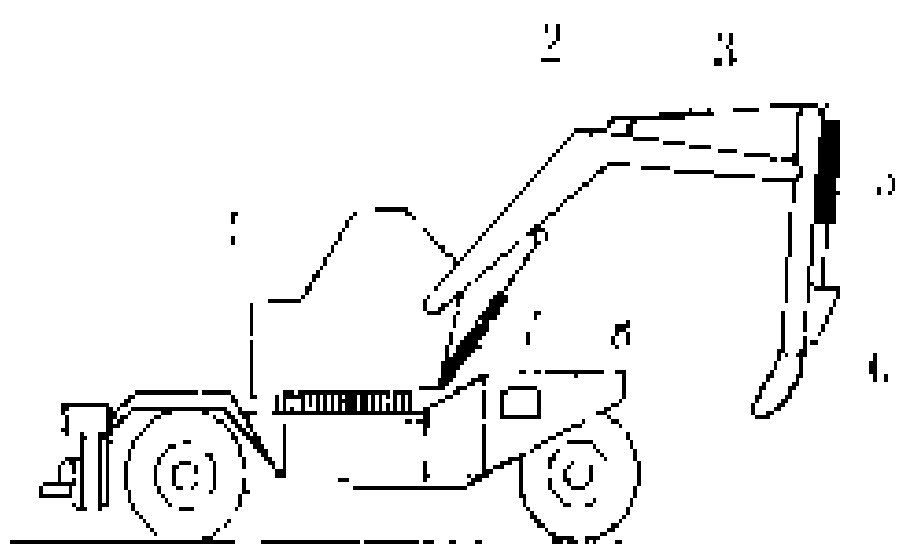


图1 液压挖掘机结构示意图  
1—转台; 2—动臂; 3—斗杆液压缸;  
4—斗杆; 5—铲斗液压缸; 6—铲斗;  
7—动臂液压缸; 8—底盘

再操作斗杆液压缸和铲斗液压缸,使它们相互配合,进行挖掘作业。挖掘作业结束后,提升动臂,驱动转台转位卸土,然后使转台返回,进行下一挖掘作业。挖掘机特点是机动性强,转场方便,有较高的工作效率。

**钻扩机** 用于直筒式钻孔桩和扩底式钻孔桩基础孔的钻进。钻扩作业时,先钻进地面达到要求的深度,再通过特殊的机构使钻削刀头逐渐张开,进行底部扩孔作业,最后形成类似蒜头状的基础孔。钻扩机的特点是成孔规范化,无多余切削量,可保持原状土强度。图2是钻削刀和成孔示意图。

钻扩机有手动和机动两种。手动钻扩机钻杆通过轴杠用人力推动旋转,钻削刀安装在取

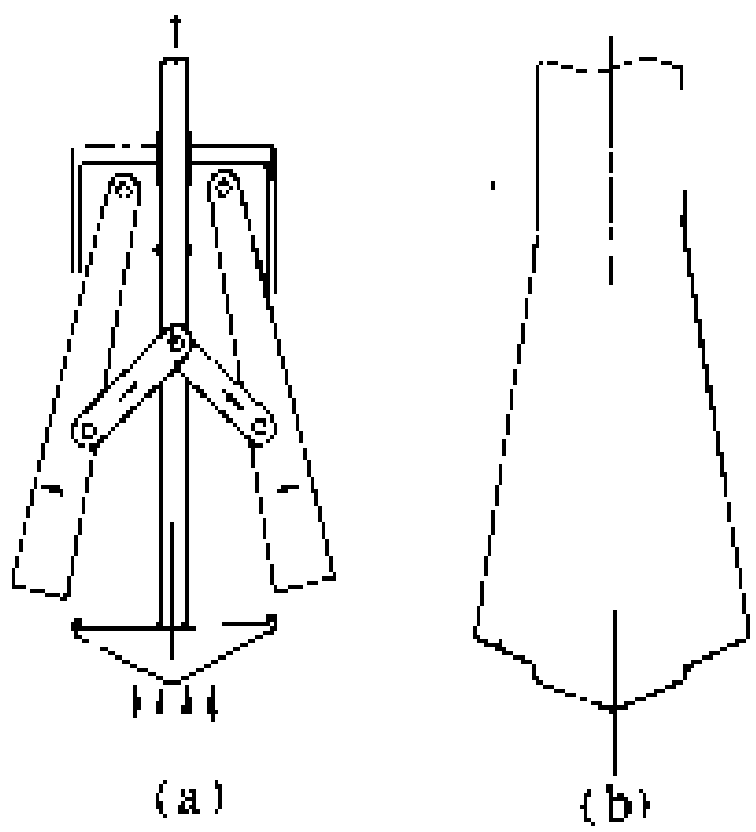


图2 钻削刀和成孔示意图  
(a) 钻削刀; (b) 成孔

下的土屑进入圆柱筒,装满后将圆柱筒提升到地面倒出土屑。机动钻扩机采用液压传动,由钻架、液压马达、行星减速器、螺旋钻杆、钻削刀架和刀头、扩孔机构、调位液压缸、液压控制系统和原动机等组成。钻进作业时,螺旋钻杆由液压马达经行星减速器减速后带动。开始时,钻削刀垂直钻削,达到要求深度后,若需扩孔,则通过扩孔机构使钻削刀头向两侧伸展,进行扩孔。土屑通过钻杆上的螺旋叶片送上地面。调位液压缸用于在一定范围内调整钻杆位置,以便对正孔位。

**凿岩机** 用于山区杆塔基础施工开凿岩石孔的冲击式钻孔机械。常用的有内燃凿岩机和风动凿岩机两种。内燃凿岩机自备动力,轻便灵活,但出力较小,都为手持式,适用于开凿炸药孔。风动凿岩机有较高的可靠性和冲击力,但须配备空气压缩机(供气压力为  $0.4 \sim 0.8\text{ MPa}$ ),又分手持式风动凿岩机和导轨式风动凿岩机两种,手持式主要用于开凿炸药孔,导轨式可直接用于开凿岩石基础地脚螺栓孔和锚筋孔等。输电线路施工专用的凿岩机采用组合导轨结构,以便拆装搬运。

内燃凿岩机由两冲程汽油发动机和凿岩机两大部分组成,发动机活塞和凿岩机冲击活塞在同一缸体内,图3是其结构图。工作时,通过发动机活塞吸入油雾状汽油和空气组成的可燃混合气体,受压后点火燃烧,气体膨胀产生高压,推动冲击活塞向前移动。发动机活塞往复运动维持发动机工作循环,冲击活塞往复运动冲击钎杆。钎杆上还带有回转机构,使它在冲击的同时进行旋转运动,达到钻孔的目的。凿岩机活塞与缸体下部形成一个空气压缩机,空气在腔内压缩后膨胀时,使活

塞复位，为下一个冲击循环作准备。

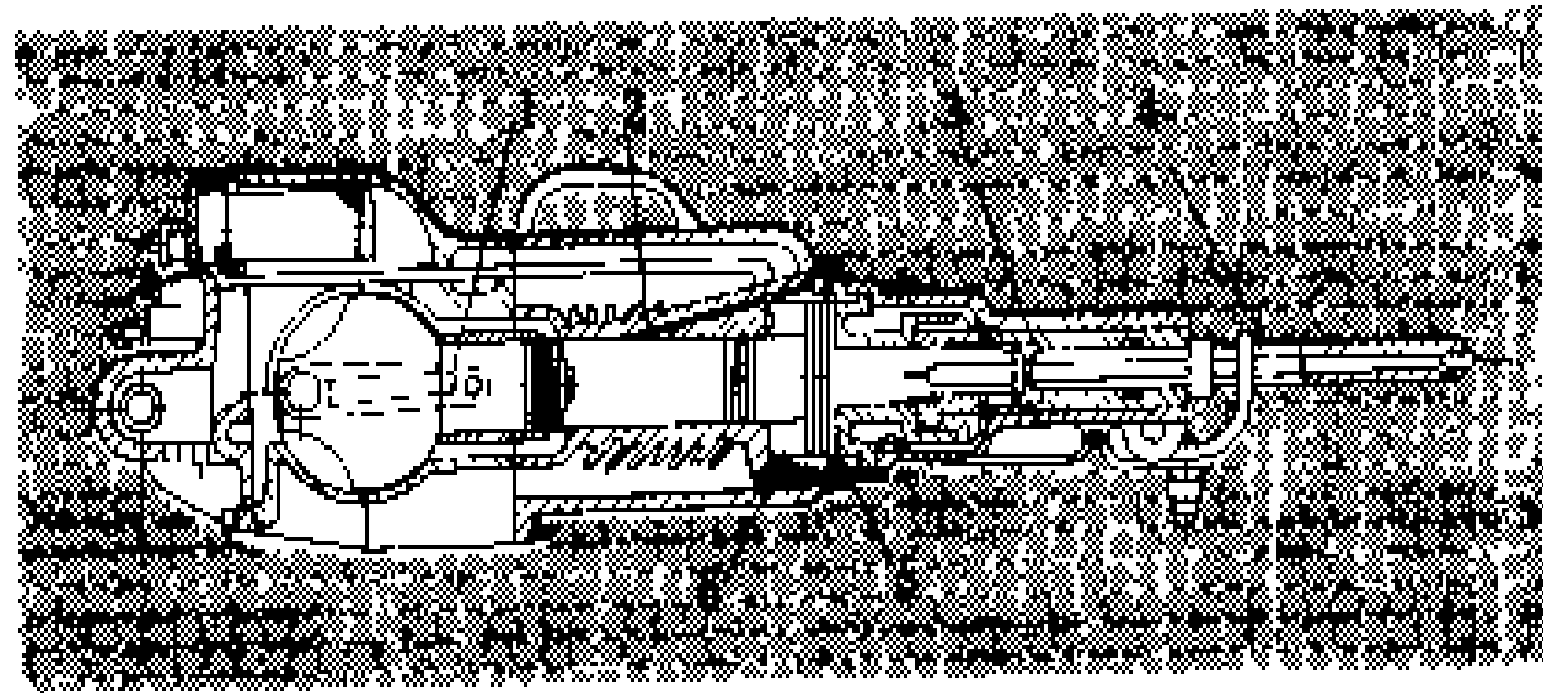


图3 内燃凿岩机结构图

- 1—发动机活塞；2—凿岩机活塞；3—转钎套筒；  
4—钎杆；5—压气室；6—前气室

导轨式风动凿岩机又称岩石钻机，由风动凿岩机和凿岩台车（或台架）配套使用，可用于钻凿直径较大（ $\phi 80 \sim 130 \text{ mm}$ ）和较深（采用接钎杆后最深可达30 m以上）的岩孔。

风动凿岩机由冲击机构、回转机构、排粉及降尘机构、推进机构和消声减震机构等部分组成。压缩空气在配气机构作用下交替进入气缸的前室和后室，推动活塞往复运动，形成冲击。工作时活塞每冲击一次，回转机构将钎杆回转一定角度，以形成圆形岩孔。排尘和降尘机构有湿式和干式两种，湿式机构是在凿岩机工作时将压力水沿钎杆中心孔注入钻孔内，使岩粉形成浆状从孔中排出；干式机构通过钎杆中心孔用压缩空气吹排岩屑，污染比较严重，只用于供水十分困难的工作场地。推进机构采用机械推进的方法。消声和减震机构除了采用合理的排气口参数外，还采用单室降压消声装置。

**夯实机** 用于杆塔基础施工时回填土夯实。由于杆塔基础坑面积较小，施工时周围空间受到一定限制，故要求夯实机体积小、重量轻。常用的夯实机有冲击夯（爆炸夯）和轻型振动夯两种。

冲击夯利用燃烧室内燃油点火后爆炸做功，使整机自身弹跳，然后靠自身下落时的势能转换成动能，冲击夯实回填土。冲击夯冲击力大，夯实效果较好，特别适用于粘性土壤的夯实。冲击夯的缺点是容易左右摆动。

轻型振动夯是由内燃机驱动偏心轮轴高速旋转，产生离心力，再驱动具有一定质量的夯蹄作往复振动，夯实回填土。夯蹄每分钟振动次数一般为600~700次，振幅为20~25 mm。轻型振动夯具有较大的冲击力，而且有一定起跳高度和较高的振动频率，其夯实效果比冲击夯的更好。其缺点是结构较复杂。

（蒋平海）

ganta sheji

**杆塔设计** (pole & tower design) 对一种既定类型的杆塔进行荷载计算，主要尺寸确定，结构体

系选择，结构内力与变形分析，强度、稳定和刚度等校核，最后绘制加工详图与组装图的全过程。杆塔设计的目的是既保证杆塔结构的强度与稳定满足要求，又要经济合理。在架空输电线路工程中，杆塔建设费用占本体投资的30%左右，因此杆塔选型与设计方法之优劣，往往决定着整个工程是否经济合理。杆塔设计在输电线路工程设计中占有重要的地位。

根据杆塔构造材料的不同，杆塔结构有钢结构、钢筋混凝土结构和木结构，而中国主要采用前两种结构。对杆塔结构的设计方法，中国已由传统的安全系数法向以概率论为基础的极限状态法发展。

**荷载种类与组合** 杆塔的荷载分为永久荷载、可变荷载与偶然荷载三类。永久荷载如结构与架空线的重力和线条张力等；可变荷载如覆冰、风力和安装荷载等；偶然荷载如断线张力、地震和架空线的振动荷载等。荷载的组合各国不尽相同，中国规定有运行情况、断线情况和安装情况三种组合形式。运行情况组合包括三种可能：最大风速、无冰、不断线；最大覆冰、微风、不断线；最低气温、无冰、无风、不断线。断线情况组合是按不同杆塔类别及每相导线的多少来选定断线的数量及断线张力的大小，一般对耐张、转角杆塔，断线条件从严，对采用分裂导线的杆塔，断线条件从宽。断线情况组合目的是要使杆塔的纵向强度有必要的保证。安装情况组合考虑10~15 m/s风速、无冰气象条件及不同类型杆塔可能发生的安装情况，其目的是为了保证杆塔在安装作业时有必要的强度，以确保人身安全。

**荷载标准及计算** 杆塔荷载主要是风荷载与冰荷载。由于覆冰的原始记录一般不完整齐全，因此，常向运行部门或当地居民收集了解情况，加以论证判定。一般地区导线覆冰厚度采用5~10 mm，个别覆冰严重地区采用15~30 mm。对于风速，由于一般原始记录比较齐全，因此常采用数理统计方法来确定。设计用最大风速的选取各国不尽一致，世界上多数国家采用3~5 s为时距的50~150年一遇的瞬时风速，中国规定取离地面15~20 m高（220 kV及以下线路取15 m，500 kV线路取20 m）、15~30年（220 kV线路取15年，500 kV线路取30年）一遇的10 min时距平均最大风速。一般平坦地区常用25~30 m/s，山区及沿海地区常用35~40 m/s。

(1) 架空线的风荷载。垂直于线条方向传输给杆塔的风荷载，其大小与水平档距、线径、风压等成正比。世界上多数国家还考虑阵风效应系数 $G_r$ ， $G_r$ 取值一般在1.5~3.0之间。考虑到沿架空线的档距全长不可能同时出现大风风头，因此还考虑风速不均匀系数 $\alpha$ ，多数国家采用随档距增大而减小的 $\alpha$ 值，中国、苏联等国

采用随风速增大而减小的数值，一般取  $\alpha=1\sim0.6$ 。当风向与线条呈夹角时，垂直线条方向荷载将减小，而顺线条方向分量多数国家认为可忽略不计，有些国家规定取 0.15~0.25 倍垂直线条方向荷载量。

(2) 杆塔身的风荷载。顺风力方向的杆塔身风荷载，与风压、迎风面杆塔杆件挡风面积、与杆件形状有关的体型系数成正比。圆形杆件的体型系数比较小，因此风荷载也比较小。此外，杆塔身风荷载一般尚需考虑由于结构自振周期与风头脉动分量的周期相接近而发生共振的效应，一般以风振系数考虑，其值在 1.25~2.0 之间。对比较高的杆塔，杆塔身风荷载采用分段计算。对架空线和杆塔身风荷载计算，当距地面比较高时，均需考虑风速随高度而增加的因素。

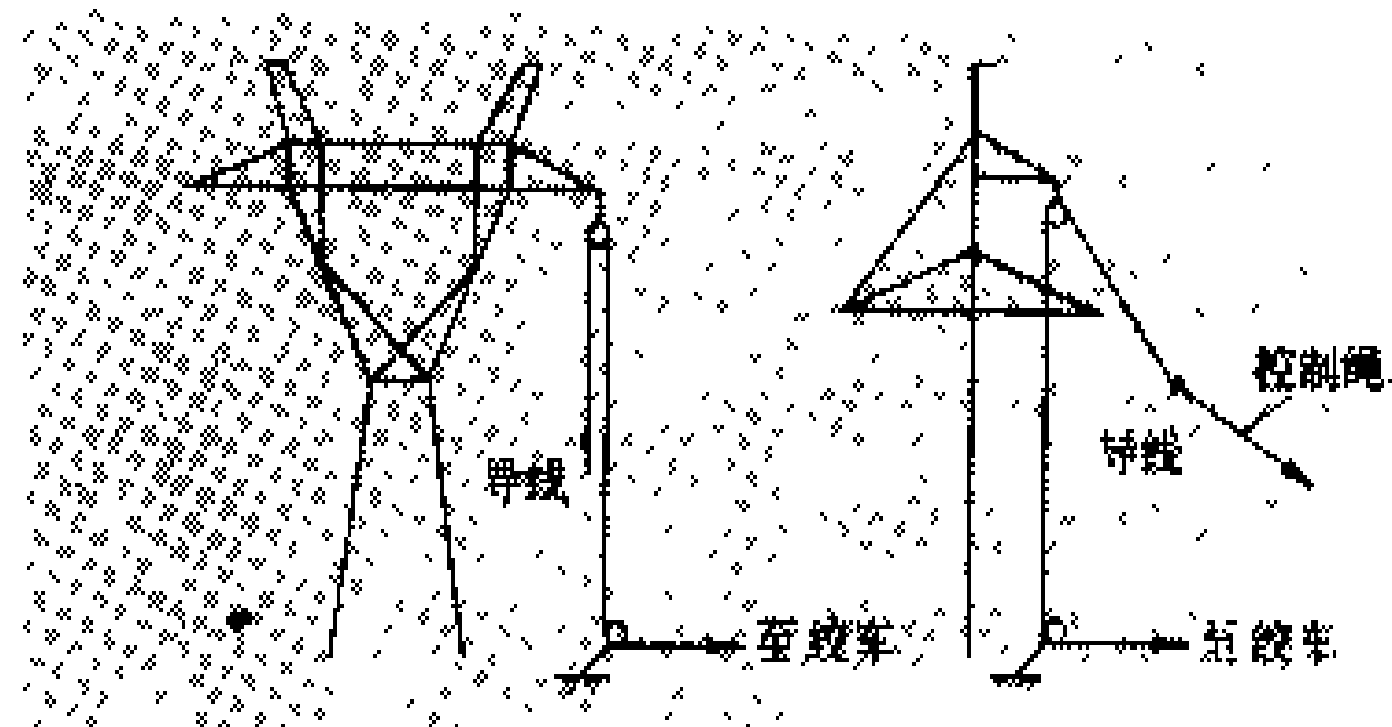


图1 直线型杆塔双倍起吊

(3) 线条张力。因线条张力产生沿杆塔平面内的水平荷载和垂直杆塔平面的荷载，对耐张型杆塔，这种荷载是主要的，对常规直线型杆塔，这部分荷载常被略去不计。

(4) 施工与检修荷载。直线型杆塔上架空线的施工与检修荷载，设计时一般按图 1 所示的双倍起吊法考虑。如果在杆塔上再设置一个滑轮，则为一倍起吊法，如图 2 所示，它对杆塔的荷载要小得多。

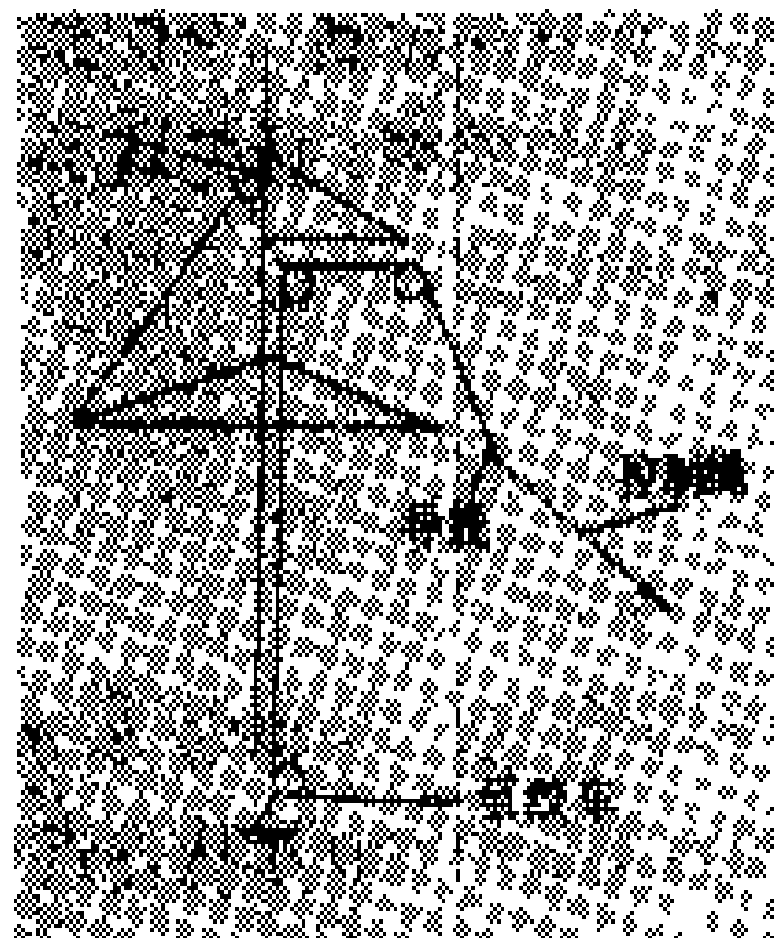


图2 直线型杆塔一倍起吊

耐张型杆塔上紧线时的施工荷载，设计时按图 3 方法考虑。

垂直下压力： $G=T\sin\alpha$ +导线重+人及工具重  
不平衡张力： $\Delta T=T(1-\cos\alpha)$

式中  $T$  为导线水平张力； $\alpha$  为牵引钢绳对地平面的夹角。

设计方法 中国对钢结构杆塔是以材料弹性理论为基础按许用应力方法计算的，对钢筋混凝土结构杆塔是以破损理论为基础按安全系数方法计算的，近年来正在研究以概率理论为基础的极限状态设计方法。国外多数则采用以材料屈服强度为基础的极限状态设计方法。

以材料屈服强度为基础的极限状态设计方法是根

据所规定的荷载乘以荷载系数（即超载系数），设计成结构最大工作应力接近拉伸屈服或压曲破坏强度。这是美国土木工程师协会（ASCE）输电线路铁塔设计导则采用的方法，现为许多国家所采用。以概率理论为基础的极限状态设计方法是将荷载视为随

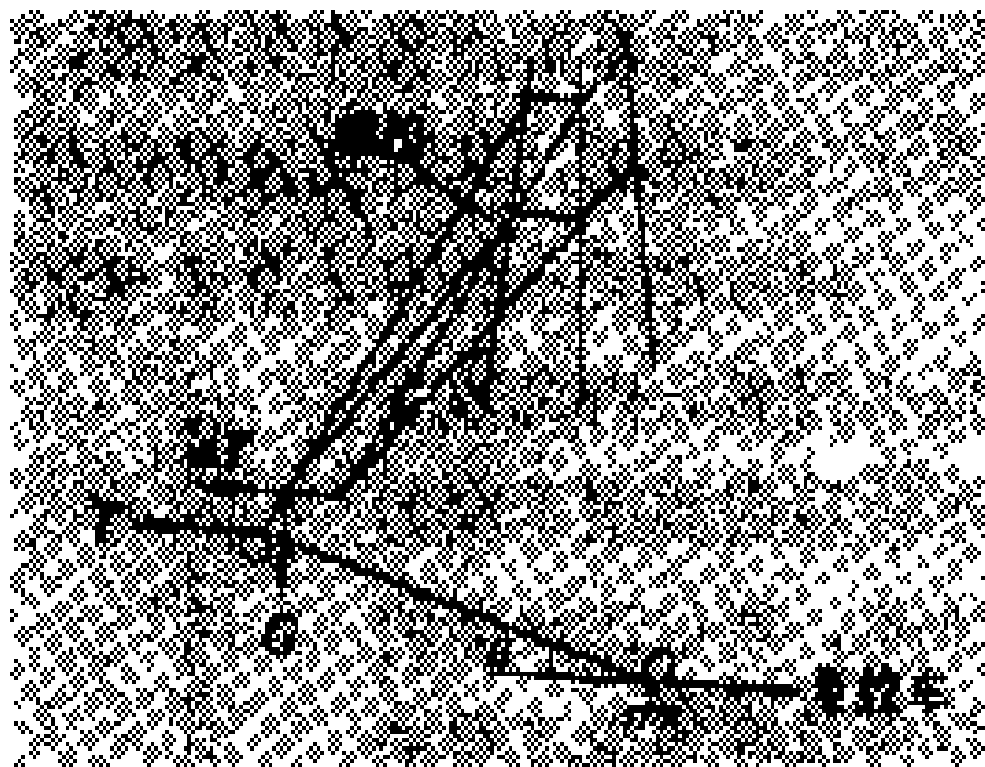


图3 耐张型杆塔一侧紧线

机变量，用结构保证概率来表示结构的可靠度，并使结构在预定使用期内超过各种极限状态的概率（或称失效概率）小到可以接受的程度。近年来，国际电工委员会（IEC）对输电线路结构的以概率理论为基础的设计方法进行了研究，并提出对受风、覆冰随机荷载时计算结构失效率等的具体建议，理论上比较先进。

设计原则 对钢结构的塔架按理想铰接的立体桁架或平面桁架计算，对钢筋混凝土结构的杆塔一般按平面框架进行内力、变形和强度计算。杆塔结构除必须作强度计算外，必要时还须作变形校核，对钢筋混凝土结构还须核算裂缝情况。鉴于杆塔结构建筑点非常分散且长期暴露于大气中，因此设计时必须十分重视安装与维修的方便，故常采用散件或成片状组合件，再用螺栓在现场连接拼装成整体，而且这样的构造也便于采用热浸镀锌的防腐蚀工艺。热浸镀锌是杆塔结构特殊的防腐要求，实践表明，好的热浸镀锌结构可以有 50 年以上的不维护使用期。

铁塔内力及变形计算 铁塔内力及变形计算是按理想立体铰接桁架进行的。由于是桁架结构，因此杆件只承载轴向内力，在以往采用手工计算时，一般均简化为平面静定桁架，其典型计算方法如图 4 所示。

主材内力： $U=\Sigma M_O/(2b)+\Sigma G/(2\sin\alpha)$

斜材内力： $S=\Sigma M_C/(2r)$

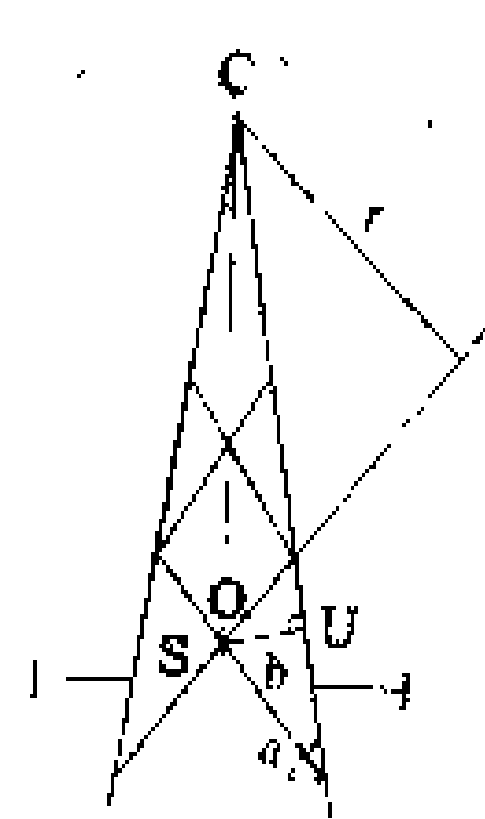


图4 平面静定桁架构件内力计算

式中  $\Sigma M_O$ 、 $\Sigma M_C$  及  $\Sigma G$  分别为 1—1 断面以上的荷载对 O、C 点的力矩之和及垂直荷载之和。

利用结构力学变形体的虚功原理可以对桁架作变形计算，手工计算时相当繁杂，其典型计算式为

$$\Delta=\sum_1^n\left(\frac{N_pN_1l}{EA}+\frac{1}{2}N_1e\right)$$

-- 杆件弹性变形+螺栓孔变形

式中  $n$ 、 $E$ 、 $A$ 、 $l$ 、 $e$  分别为拟计算变形方向上的杆件总数、杆件的弹性模量、截面积、长度和螺杆与螺孔之间孔隙； $N_p$ 、 $N_1$  分别为杆件在外荷载作用下的内力及在拟计算变形方

向上作用单位力时的杆件内力。

目前铁塔内力及变形计算均已由手工计算发展到借助电子计算机用程序来实现, 计算程序通常采用有限元方法编制, 其计算速度快且精度高。

钢筋混凝土杆内力及变形计算 钢筋混凝土杆类型比较多, 内力及变形计算因类型不同而不同, 现仅选典型的拉线单杆和带叉梁的双杆予以介绍。

(1) 拉线等径单杆内力及变形计算。按弹性支承梁的图式进行计算, 首先求解出拉线支承点的反力  $R$ , 然后根据  $R$  求解拉线最大张力  $T_{max}$  及拉线点的位移  $\Delta$ , 在计算杆身强度时还需考虑由于杆身挠曲而产生的附加弯矩。电杆埋置较浅时的受力简图如图 5 所示。

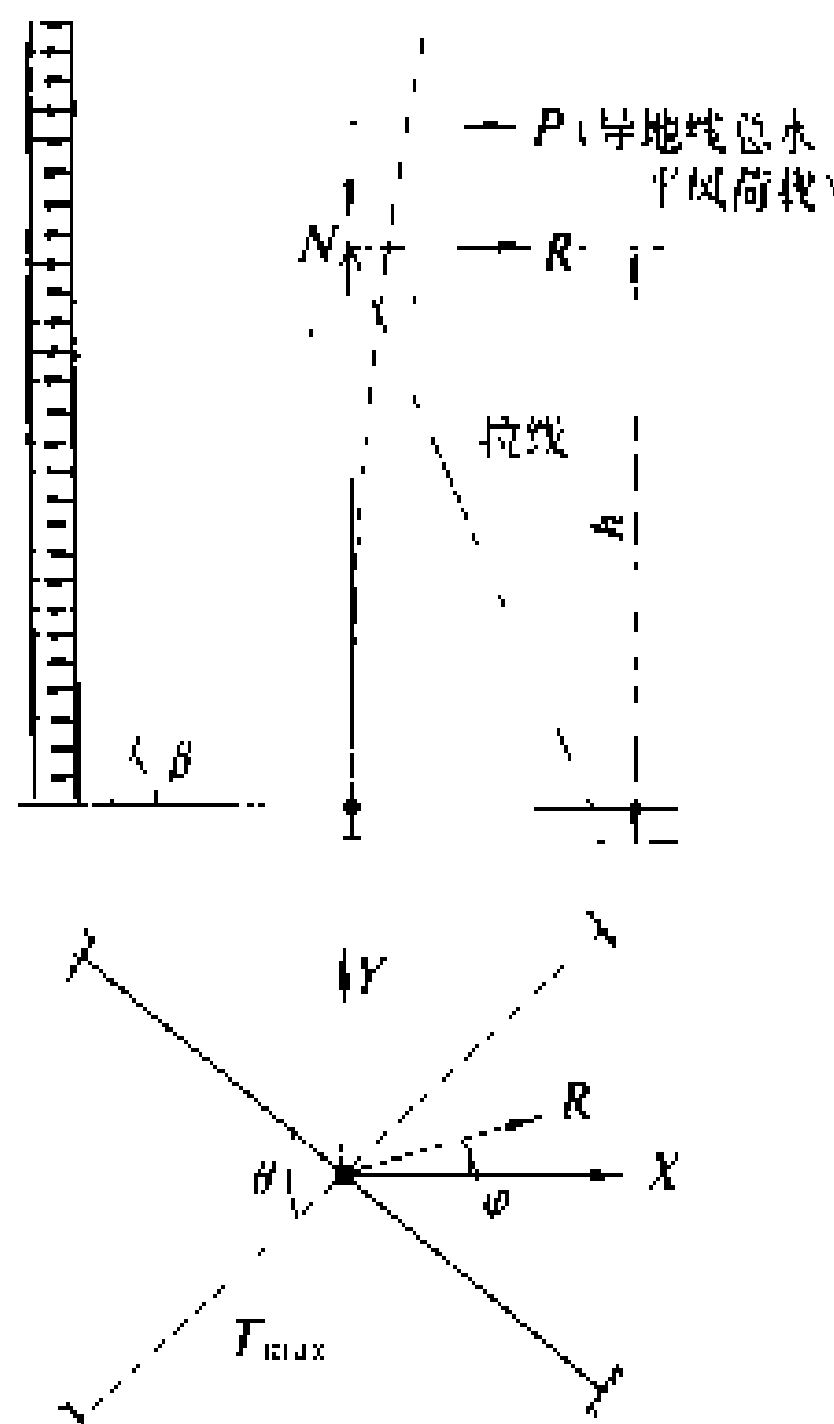


图 5 拉线等径单杆受力简图

杆身中部弯矩:  $M = M_0 + Nf$

$$\text{拉线最大张力: } T_{max} = \frac{1.05R \sin\left(\frac{\theta}{2} - \varphi\right)}{\sin\theta \cos\beta}$$

拉线点反力:  $R = \sqrt{(\Sigma M_x)^2 + (\Sigma M_y)^2} / h$

杆身中部挠度:  $f = f_0 / (1 - kN / N_{cr})$

式中  $M_0$  为水平外荷载作用下不计  $N$  影响时杆身中部的弯矩;  $N$  为导地线总垂直荷载和拉线总下压力之和;  $R$  为  $X$ 、 $Y$  方向水平外荷载在拉线点引起的反力;  $\Sigma M_x$ 、 $\Sigma M_y$  为  $X$ 、 $Y$  方向水平外荷载对杆底的力矩;  $\theta$  为相邻两拉线间的水平投影角;  $\beta$  为拉线对地面间的夹角;  $\varphi = \text{tg}^{-1} M_y / M_x$  为拉线点反力对  $X$  方向间的夹角;  $h$  为拉线点至杆底的高度;  $f_0$  为水平外荷载作用下不计  $N$  影响时杆身中部的挠度;  $N_{cr}$  为拉线点以下电杆的临界压力;  $k$  为安全系数。

$$\text{拉线点位移: } \Delta = \frac{(T_{max} - T_0) l}{AE \cos\left(\frac{\theta}{2} - \varphi\right) \cos\beta}$$

式中  $T_0$  为拉线的初张力;  $l$  为拉线长度;  $A$  为拉线截面积;  $E$  为拉线的弹性系数。

(2) 带叉梁等径双杆内力及变形计算。按平面框架的图式进行计算, 采用近似分析法时, 首先假定左右杆受力分配系数, 杆在土中嵌固深度等参数, 然后从假定零力矩点开始作杆身的力矩图。一般假定地面以下

1/3 埋深处为电杆的嵌固点, 在水平荷载作用下, 从叉梁的下节点到嵌固点之间杆身的中点为零力矩点 (即反弯点)。该点只承受轴向力和剪力, 可视为一铰接点。电杆埋置较深时的受力简图如图 6 所示。

$$\text{主杆弯矩: } M_D = M_E = 0.33 \Sigma P \cdot h$$

$$\text{叉梁内力: } N = 0.55 \Sigma M_0 / (b \sin\theta)$$

式中  $\Sigma P$  为零力矩点以上所有水平荷载之和;  $\Sigma M_0$  为所有水平荷载对零力矩点  $O$  的力矩和;  $h$  为从叉梁下节点到嵌固点的距离;  $\theta$  为叉梁对水平线间的夹角;  $b$  为两电杆间的水平距离。

近年来广泛使用电子计算机用有限元法作平面框架的分析, 使分析的精确度得到了很大提高。

加工详图绘制 杆塔设计最后工序是节点构造的确定和加工详图的绘制。

它是设计工作中的一个重要环节, 是设计成品的最终表达。加工详图要满足加工制造、施工和运行的要求, 因此一些主要节点必须放制大样, 工作量比较大, 以往均用手工绘制。近年来采用计算机辅助设计程序绘制, 不仅提高了生产效率, 且提高了成品的质量。

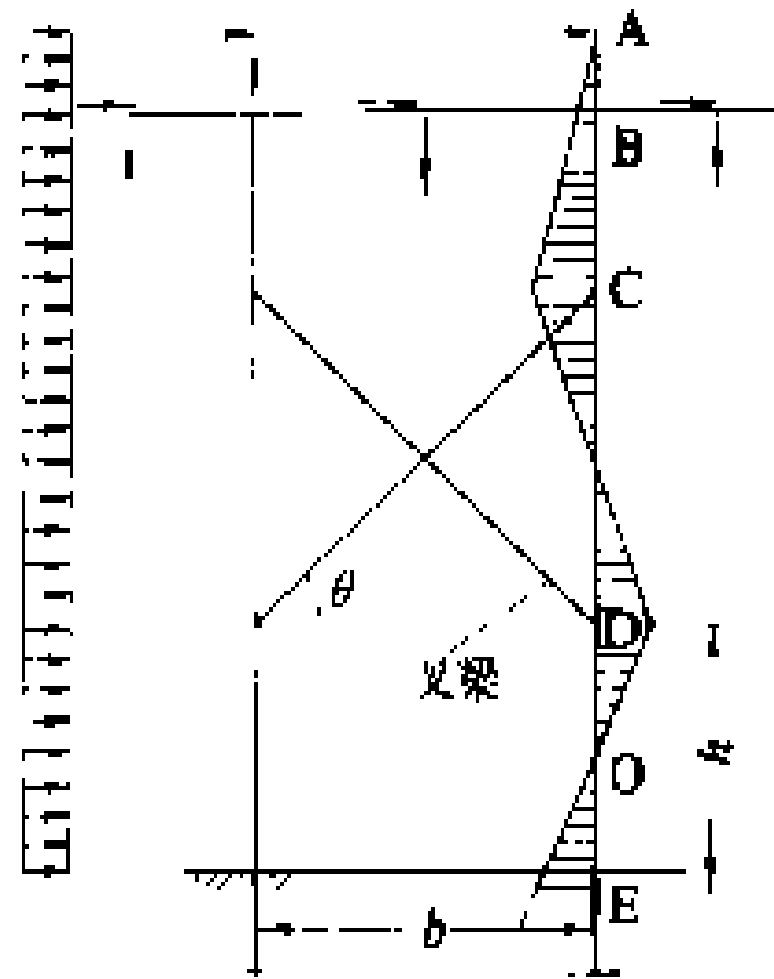


图 6 带叉梁等径双杆受力简图

(唐国安)

ganta zuli

**杆塔组立** (pole & tower erection) 输电线路施工中对杆塔构件进行组合和起立的工序。根据杆塔型式、地形和施工条件等的不同, 杆塔组立分为整立杆塔和分解组塔两类。混凝土杆常用整体组立, 铁塔一般多采用分解组装。

**整立杆塔** 将杆塔的全部或大部分构件, 在地面组装后, 利用起重机械或抱杆等机具, 把整基杆塔竖立到预定的位置。目前, 常用的整体组立方法有倒落式抱杆整立杆塔, 座腿抱杆、移动起重机或直升飞机整立铁塔等。

**倒落式抱杆整立杆塔** 将作为整立工具的人字形抱杆跨于杆塔的内侧 (或外侧), 牵引抱杆, 使抱杆绕着地面的某一点转动, 带动杆塔起立; 当杆塔起立至一定角度后, 抱杆失效并倒落; 随即, 杆塔依靠直接牵引而竖立至预定位置, 如图 1 所示。杆塔起立后, 随即进行各部位尺寸及位置的调正, 然后进行固定。

整立施工设备主要包括：①固定钢绳系统。其作用是将牵引动力通过抱杆更有效地传递并作用于杆塔，常用的钢绳固定方式有单点固定、两点固定及多点固定三种。②动力及牵引系统。为减小所需动力，牵引常用复滑车组。动力有人力或机动绞磨、手摇或机动绞车、卷扬机、拖拉机等。③人字抱杆。由抱杆本体、抱杆帽、抱杆脚及自动脱落环等部件组成，常用的抱杆有木质、角钢或铝合金角材及钢管抱杆等多种。④制动系统。由滑车组、制动器及地锚等组成，主要用来控制杆根位置或平衡铁塔的水平推力。⑤拉线及绞链。拉线的作用是确保杆塔在整立过程中侧向及牵引方向的稳定，绞链的作用是固定塔脚并使杆塔绕它转动。

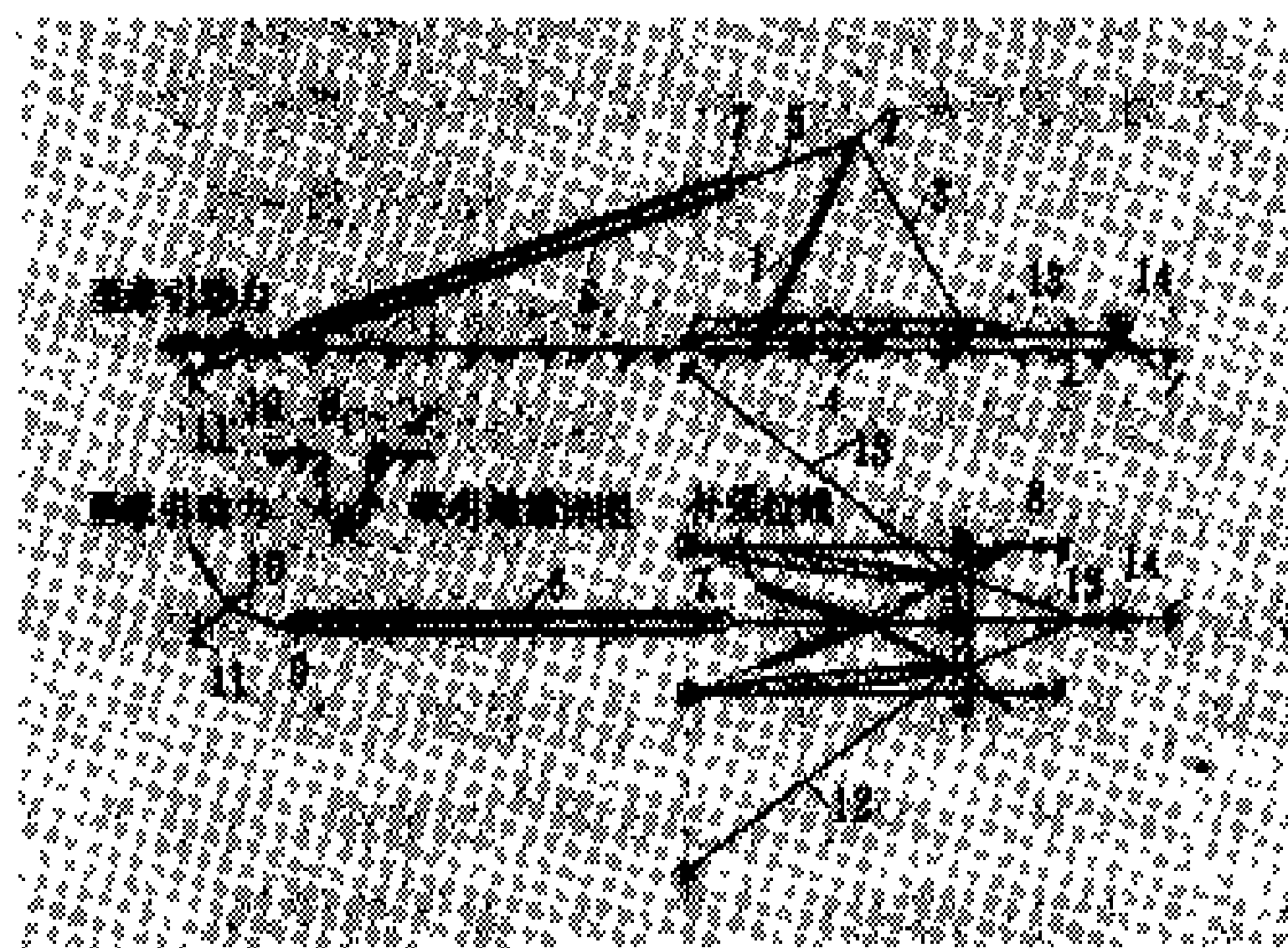


图1 倒落式抱杆整立门型杆塔

1—抱杆；2—自动脱落环；3—固定钢绳；4—支垫；5—总牵引钢绳；6—牵引复滑车组；7—动滑车；8—制动钢绳；9—定滑车；10—导向滑车；11—牵引地锚；12—侧面临时拉线；13—后侧拉线；14—后侧控制动力

**座腿抱杆整立铁塔** 倒落式抱杆整立杆塔的推广与发展，适用于整立宽基铁塔。其特点是抱杆直接座落在被整立铁塔的顶面两个腿上，有效地降低了抱杆的高度。抱杆与塔腿之间采用铰接。为防止塔脚构件变形，需采取相应的补强措施。在铁塔整立过程中，由于抱杆、固定钢绳、铁塔三者之间的相对位置，在抱杆失效前是固定不变的，故有利于安全操作，也简化了施工设计。

**移动起重机整立杆塔** 利用专用的或经过改装的起重机械整立杆塔，具有操作简单可靠、整立过程短等特点。操作方法分为单机作业和双机联合作业两类。

(1) 单机作业。先在杆塔基础附近进行杆塔组装（包括装好绝缘子串及放线滑车），然后利用起重机的吊臂将塔吊离地面，通过调整拉线控制铁塔正确就位。也可利用绞链，使塔腿绕其旋转的方式来整立铁塔，其优点是操作较平稳，且起吊重量较小。

(2) 双机联合作业。先用起重机将杆塔旋转起立至与地面夹角 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ，余下的工作，则由另一台起重机通过直接牵引来完成。其最大优点是不需用专用机械，

对第一台起重机也不必进行大量的改制工作。

**直升飞机整立杆塔** 由于受地形、设备等诸多条件的限制，中国自1987年开始，在少数输电线路的个别地段，采用S-61、BV-234型直升飞机分别整立2.6t及8.5t以下的铁塔。其方法是：将铁塔在组装场集中组装后，用直升飞机将整塔直接吊运到塔位进行安装。国外采用直升飞机整立杆塔的基本方法是：在整个线路走廊附近设立几个中间站，在中间站把铁塔组装好后，用直升飞机把整塔连同拉线和绝缘子等，吊往各个塔位，地面作业人员只需将塔腿的底脚和拉线分别固定在相应的基础上，即完成立塔工作。

**分解组塔** 将整基铁塔分解成段、片或各个单肢，然后利用抱杆或起重机械等机具，按分段、分片或单肢起吊等方式，自下而上逐段完成整基铁塔的组装工作。主要有外拉线抱杆、内拉线抱杆、悬臂抱杆等方法。

分解组塔一般可不受地形及线路方向等条件的限制，起吊设备也较简易，且适用于各类塔型。分解组塔的缺点是高空作业多，速度慢。为克服分解组塔的不足，近年来，中国推广应用了倒装组塔、移动起重机或直升飞机分解组塔等新工艺。

**外拉线抱杆分解组塔** 利用抱杆作为起吊工具，其头部通过一组（通常为四根）锚固于地面的外拉线进行固定与调整，其根部利用钢绳绑固于铁塔主材上。随着塔的组装增高，抱杆也随之升高。这样，使用一套8~12m长的抱杆，即能组装整基铁塔。塔件起吊可采用单抱杆、双抱杆、四根抱杆等三种方式。单抱杆起吊方式多用于组装窄身杆塔。抱杆通常座在铁塔主材的内侧（分段吊装时则座于外侧）。双抱杆起吊方式适用于根开不超过9m的较高铁塔（抱杆呈对角布置）或门型塔。四根抱杆起吊方式主要用于大根开、每段主材重量超过1t的铁塔。

**内拉线抱杆分解组塔** 又称悬浮抱杆分解组塔，是中国于20世纪60年代在外拉线抱杆分解组塔基础上发展的组塔方法。其特点是：①将固定抱杆头部的一组外拉线改为内拉线（即锚固在已经组装好的铁塔顶部主材上）；②抱杆根部用一组下拉线（即承托钢绳）进行悬浮式固定，起吊塔件时抱杆基本处于垂直位置；③起吊滑车朝天安装于抱杆顶端，以改善抱杆受力及增加抱杆有效高度。内拉线抱杆组塔适用于分片或单肢起吊，其方法分单吊法和双吊法两种。单吊法是将每段铁塔分为两片，分两次起吊与安装。双吊法是采用一个动力、两套牵引系统，同时起吊、安装两片构件，如图2所示。双吊法不但速度快，且由于两侧对称作业，组装时更平稳可靠。

**悬臂抱杆分解组塔** 为便于组装大根开铁塔或高

塔，在抱杆本体（即主抱杆）的上部，再成对安装两副或四副（互成直角布置）悬臂，利用悬臂进行分片或单肢组装。

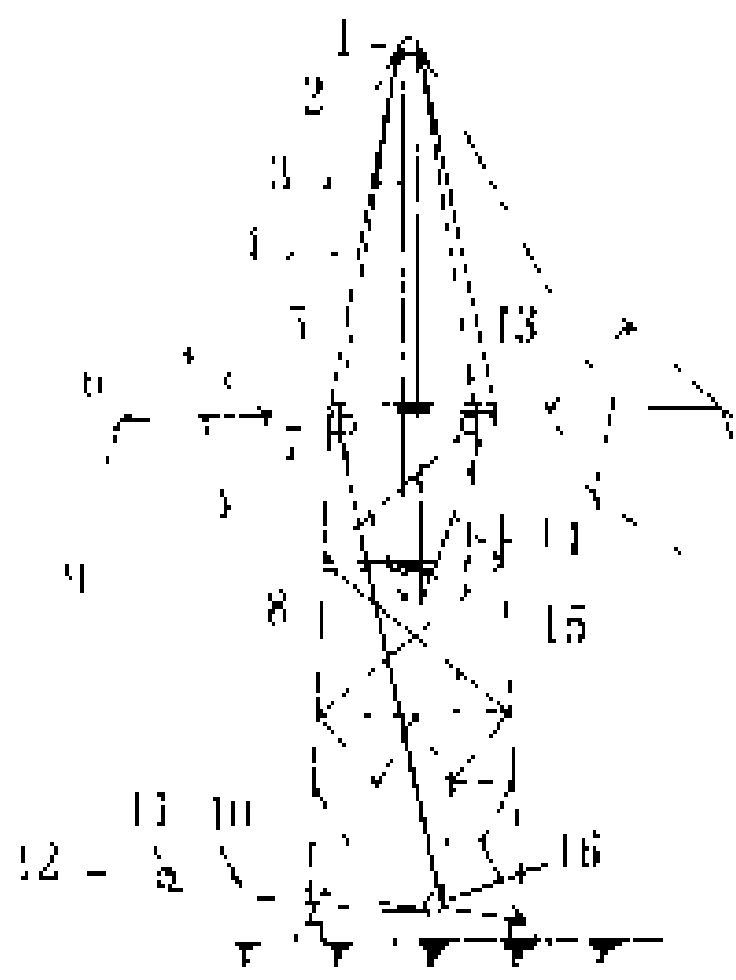


图2 双吊法的现场布置  
1—双轮朝天滑车；2—起吊钢丝绳；3—内拉线抱杆；4—上拉线；5—起吊钢丝绳；6—起吊构件；7—腰滑车；8—朝天滑车；9—调整大绳；10—牵引绳；11—平衡滑车；12—至牵引设备；13—上腰环；14—下拉线；15—下腰环；16—地滑车  
抱杆底部利用下拉线（即承托钢绳）进行悬浮式固定。

移动起重机分解组塔 起重机具有起吊重量大、机动灵活、操作安全可靠等特点。常用的移动起重机有汽车式或履带式吊车、塔式吊车等。作业方式分为混合组装和全机械组装两类。

(1) 混合组装。将吊车置于塔位中心或两侧，采用分片或单肢吊装的方法，分解组装塔腿部和塔身部。余下的部分则采用内拉线抱杆、悬浮式悬臂抱杆或倒装组塔等方法，继续组装。

(2) 全机械组装。一般采用大型吊车，以分片吊装方法完成整塔的组装。中国曾用内附着式塔吊分解组装过 235.75 m 的特高塔，塔吊自身设有爬升装置，并可在轨道上行进，塔吊与铁塔间设置了 12 个固定附着点，以保证整机刚度和稳定，并根据起吊需要，塔吊可接长升高到 250 m，最后利用自身液压顶升装置进行塔吊的拆除工作。

参见彩图插页第 4 页 11 图。

倒装组塔 利用外装支架或铁塔塔腿作为支承，将铁塔自上而下地逐段吊装组立。中国是从 1973 年开始采用倒装组塔方法的，起初仅用于安装宽身高塔，后又推广到安装窄身拉线塔。近年来，倒装组塔已用于安装 220~500kV 各型铁塔和高塔。常用的方法有全倒装和混合倒装两种。

(1) 全倒装。利用工具式倒装支架作支承，对铁塔自上而下地反复进行组装、提升、倒装，主要用于组装窄身塔。

(2) 混合倒装。先组装塔腿部，然后以此为支承，整立塔头部；继续以塔腿部为支承，反复组装、提升、倒装塔身部；最后进行两大段的合拢工作，如图 3 所示。宽身塔较多采用混合倒装。

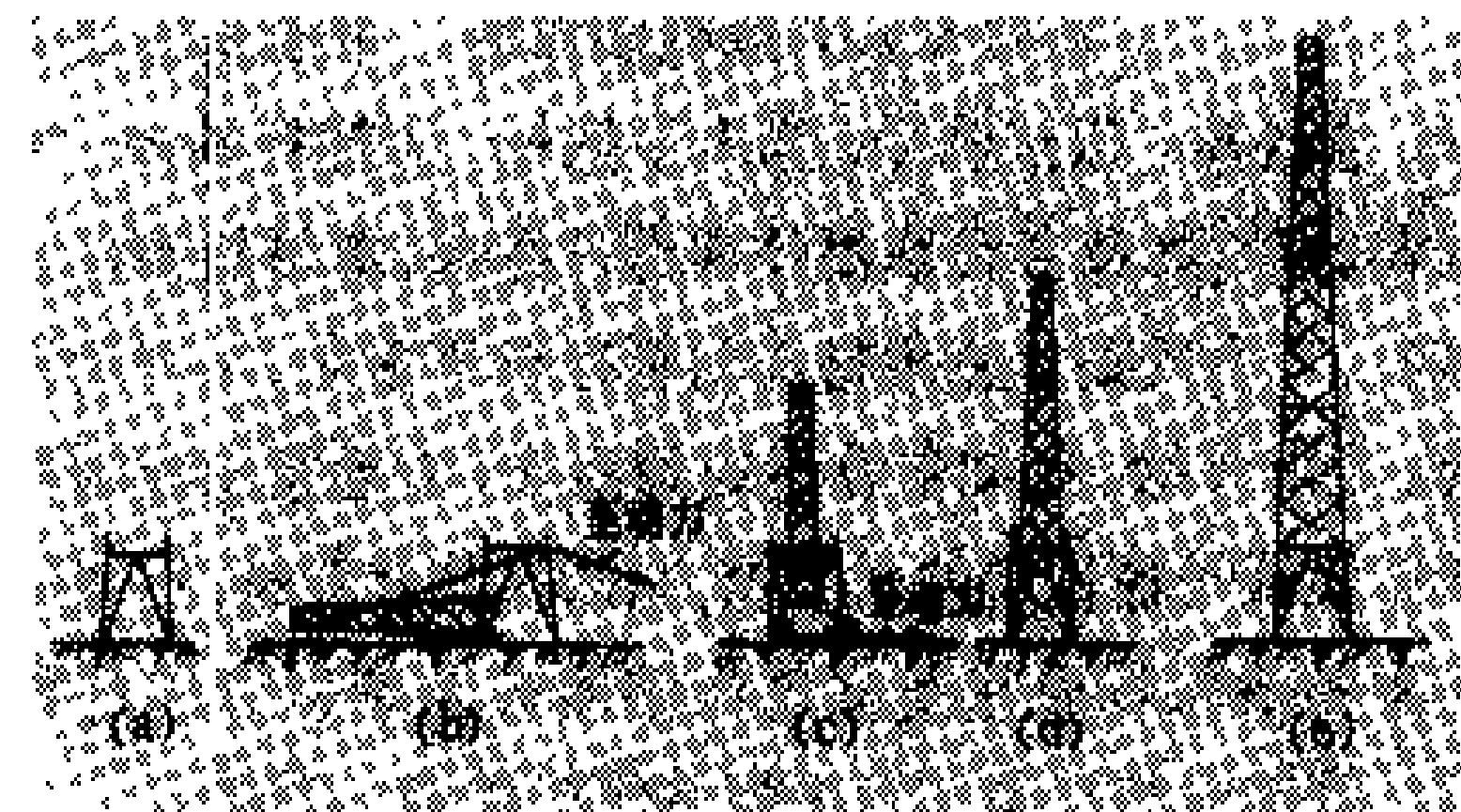


图3 倒装组塔的工作顺序（混合倒装）  
(a) 组装塔腿部；(b) 整立塔头部；(c) 提升、倒装之一；(d) 提升、倒装之二；(e) 对接合拢

直升飞机分解组塔 在杆塔设计时，就应根据直升飞机的起吊重量和特点，确定杆塔的分段及节点构造。吊装时各分段之间，应便于连接、组装。用直升飞机分解组塔，具有快速、优质、作业条件好等特点，故得到了北美和西欧不少国家的重视与推广。中国自 1987 年开始在少数送电线路的个别地段，采用 S-61 型直升飞机分解组装全重 5.6 t 以下的铁塔，全塔分两段或三段吊装，通过特制的导轨，使吊装的上段与已装的下段实现就位对接，安装速度较高。参见彩图插页第 5 页 14 图。

国外现状 各国的杆塔组立方法，与各自的机械化程度及使用的机械设备有关，美国和加拿大机械化程度较高，西欧、日本次之。大型汽车起重机不仅用于搬运塔材，也越来越多地用于组立杆塔，同时已有不少国家推广采用直升飞机组立铁塔。美国一般采用履带式吊车、大型汽车起重机整立铁塔，对高大型塔，则用分解组装。日本过去一直沿用分解组塔（采用顶升式抱杆分解组塔），但近年来，也在扩大机械化施工水平，如采用大型起吊机械组立铁塔。西欧通常采用机动吊杆组塔，大型起吊机械则主要用于交通方便地区。苏联使用钢筋混凝土杆较多，杆塔组立也以发展机械化整立为主。

参考书目

潘雪荣，高压送电线路杆塔施工，北京：水利电力出版社，1984

（潘雪荣）

ganta zuli shigong jiju

杆塔组立施工机具 (tools & machines for erection of pole & tower) 用于输电线路杆塔组装、起吊、就位的机具。杆塔组立施工机具除一



般起吊需用的钢丝绳、抱杆和其他小型专用工具外,重要的有适应杆塔倒装技术的液压提升装置和用作起吊动力的轻型机动绞磨。

**液压提升装置** 以压力油为动力,推动千斤顶活塞作往复运动,借助与活塞和油缸相连的上下卡紧机构,使承载体不断运动并将其荷载进行交替转换,从而实现提升或下降重物的起重设备。由于采用的承载体不同,液压提升装置一般可分为钢索式和钢杆式两大类。适用于杆塔组立施工的是钢索式液压提升装置,如图1所示。该装置按起重吨位大小,配置相应数量的结构形式为 $1\text{ mm}\times 7\text{ mm}\times 15.2\text{ mm}$ 的高强度钢绞线(钢索)作提升重物的承载体。

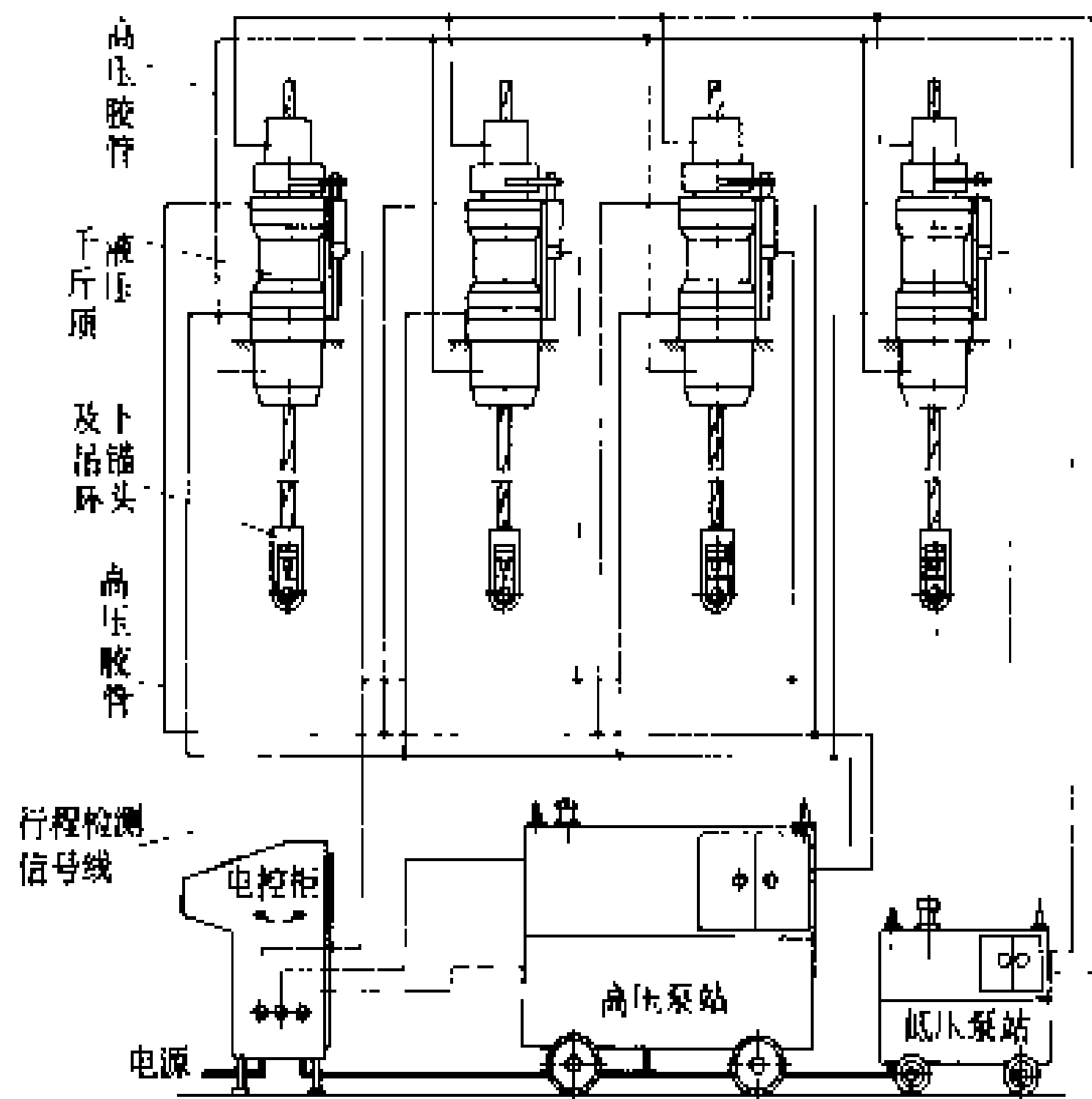


图1 GYT型钢索式液压提升装置

**上下卡紧机构** 由卡座、卡爪、提爪板、小油缸和复位弹簧组成,承载钢索从中穿过,如图2所示。卡爪是关键承力部件,外形为三瓣倒锥体,其锥度与卡座锥孔一致。卡爪位于卡座与提爪板之间,用弹性圈附着在钢索上,使卡爪处于三个工作状态:卡爪锁紧承载作业状态[见图2(a)];卡爪松开卸载、准备承载状态[见图2(b)];卡爪提起与承载钢索解列,允许钢索自由通过状态[见图2(c)]。因卡爪与卡座孔都是锥形结构,故承载钢索只能向上运动(提升)。如欲使承载钢索向下运动(下降),则必须进行程序操作,令小油缸顶起提爪板,提起卡爪,以解除其单向承载特性后方可实现。

**工作原理** 根据不同的作业要求,钢索式液压提升装置具有带载提升和带载下降两种不同工作原理的作业。

(1)带载提升作业。作业过程中提爪板不动作。①起始位置时千斤顶缸体固定,活塞在零位(活塞工作行程为 $200\text{ mm}$ ),下卡爪紧锁钢索而承载;②压力油进

入主油缸下腔,推动活塞与上卡座由零位上升 $10\text{ mm}$ ,上卡座锥孔使上卡爪锁紧钢索而承载,此时下卡爪松开荷载转换到上卡爪,活塞继续上升带动承载钢索提升;③活塞带载上升到行程终点 $200\text{ mm}$ 位,使行程开关通电,电磁换向阀动作;④油路换向,活塞带载下降到 $190\text{ mm}$ 位,下卡爪自动锁紧钢索而承载,钢索停止运动,上卡爪自动松开,活塞卸载,荷载又转换到下卡爪,此时,承载钢索悬停,重物已提升了 $180\text{ mm}$ ;⑤空载活塞由 $190\text{ mm}$ 回缩到起始原位。至此,一个工作行程的提升作业完成。如此往复循环,将重物提升到预定的高度。

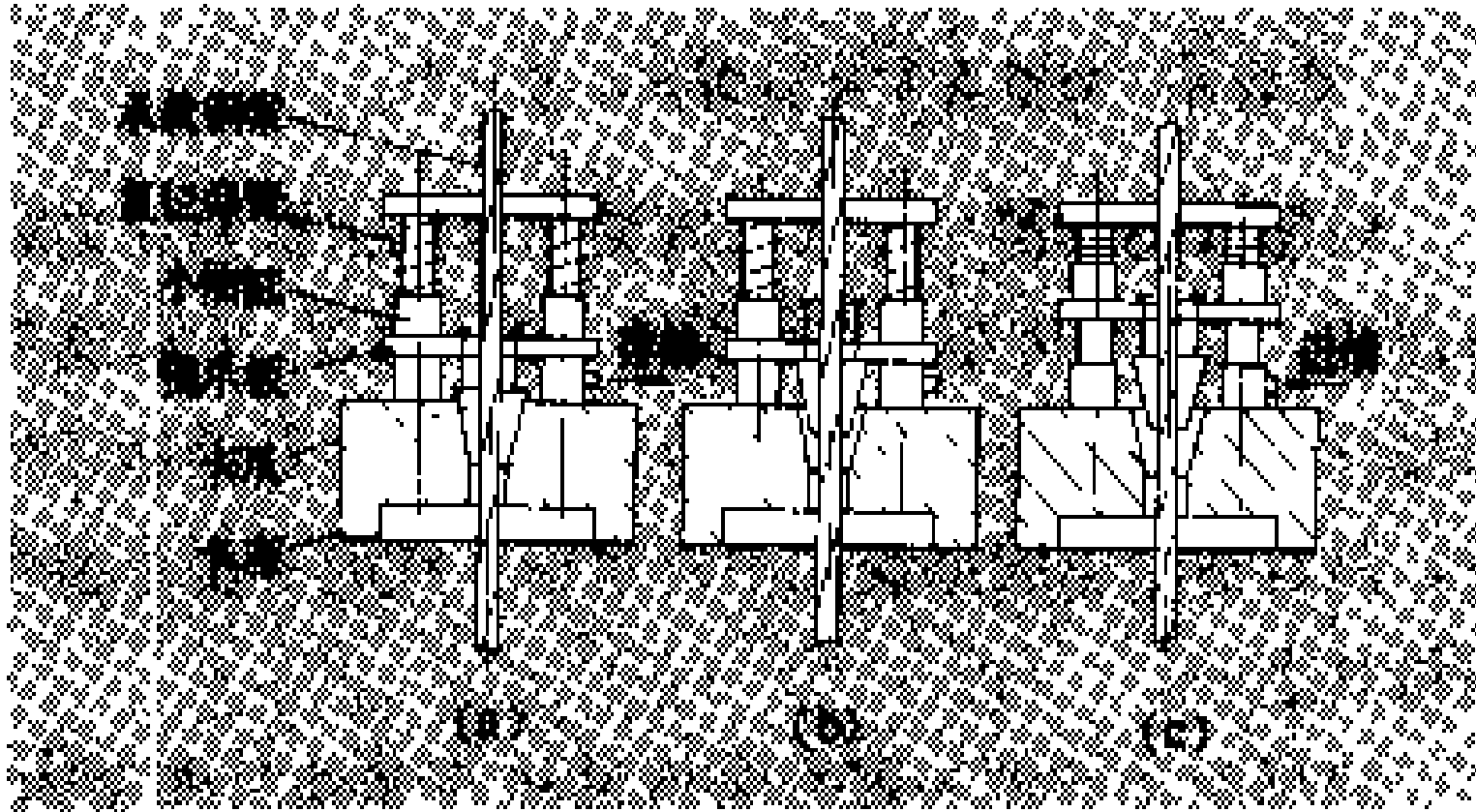


图2 上下卡紧机构示意图

(a) 承载工作状态; (b) 准备工作状态;  
(c) 非工作状态

(2)带载下降作业。作业过程中上下提爪板须按程序动作。①起始位置时千斤顶缸体固定,活塞在零位,荷载在下卡爪;②上提爪小油缸充油抬起上提爪板,提起上卡爪;③压力油进入主油缸推动活塞自零位空载上升到 $170\text{ mm}$ 位;④上提爪小油缸排油,靠弹簧力使上提爪板复位,上卡爪处于准备承载工作状态,空载活塞从 $170\text{ mm}$ 位继续上升,上卡爪将自动锁紧钢索承载直至 $200\text{ mm}$ 终点位,下卡爪卸载松开,荷载转换;⑤下提爪小油缸充油抬起下提爪板,提起下卡爪;⑥ $200\text{ mm}$ 位行程开关通电,主油路电磁阀动作,油路反向,承载活塞回缩,由 $200\text{ mm}$ 位降至 $30\text{ mm}$ 位;⑦下提爪小油缸排油,下提爪板复位,使下卡爪处于准备工作状态;⑧当承载活塞从 $30\text{ mm}$ 位降到起始零位时,下卡爪又自动紧锁钢索而承载,上卡爪卸载自动松开。至此,一个工作行程的带载下降作业完成,每次将重物下降 $160\text{ mm}$ 。如此往复循环,使重物降落到某一指定位置。

**设备特点及技术参数** GYT型钢索式液压提升装置的全套设备由四组液压千斤顶、两个泵站、一个电气控制柜、高压胶管、控制电缆、卡爪、承载钢索和上下锚头等部件组成。液压提升装置与同吨位大型起重设备相比,体积小,重量轻,转场运输方便,施工现场布置简捷,占用场地小,操作灵活,提升平稳,承载卡爪能自锁,故在进行提升或下降作业时,吊装重物可随

时悬停,工作安全可靠。其系列产品主要技术参数如 表1。

表 1 GYT 型钢索式液压提升装置主要技术参数

主 要 技 术 参 数	单 位	系 列 产 品 型 号			
		GYT-20	GYT-50	GYT-100	GYT-200
单组千斤顶额定提升荷载(起重力)	kN	196	490	980	1960
全套装置总额定提升荷载(起重力)	kN	784	1960	3920	7840
承载钢索数*	根	3	6	12	24
千斤顶工作行程	mm	200	200	200	200
额定工作油压	N/mm²	20.6	20.6	20.6	20.6
额定提升速度	m/h	12	8	7.5	6

\* 结构形式为1×7×15.2 mm 钢绞线分左捻和右捻两种,其每根破断力为 245kN,允许额定承载为 98 kN。在配制各型钢索数时,每组左右捻向钢索各占一半。

**轻型机动绞磨** 在人工绞磨的基础上配装动力设备而成。它具有体积小,重量轻,便于搬运,安装就位和操作简便等优点,特别适合于无电源的野外施工作业,是目前输电线路施工中应用最广泛的主要小型牵引机具之一。

轻型机动绞磨一般配备汽油机或柴油机作动力,其牵引力为10~15 kN。它主要由机座(带可拆装的磨芯轴架)、磨芯、离合器、变速箱与动力机械等组成。变速箱设计成二级与三级正齿轮传动或行星摆线-齿差减速机构,具有正、反转和快慢档速度输出。绞磨磨芯为单摩擦卷筒,其外形为双曲线型,喉部最小外径尺寸(D)等于卷绕钢丝绳直径(d)的10倍以上,即 $D\geq 10d$ 。磨芯曲线表面应光滑,能使钢丝绳平稳地滑动。为便于施工时穿入或抽出牵引钢丝绳,将磨芯外侧的轴架支承做成合页式,打开轴架座,就可把牵引钢丝绳穿入,往磨芯上缠绕数圈之后尾端引出。固定好轴架,用人力拉紧尾端钢丝绳,卷线钢丝绳便紧

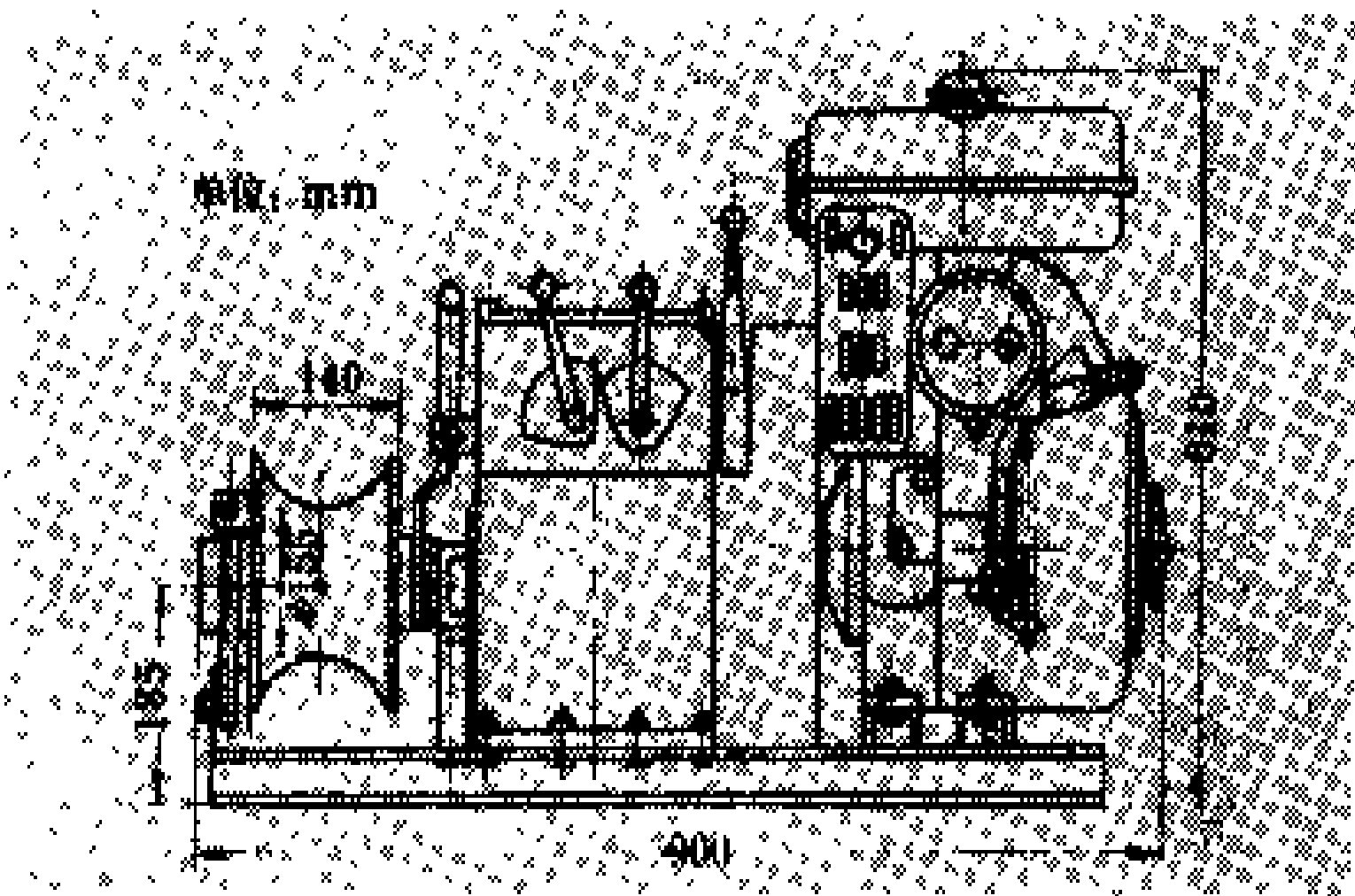


图 3 SJJ-3 型机动绞磨

贴磨芯表面产生摩擦阻力,使钢丝绳不打滑。当操纵离合器,动力机械驱动磨芯转动,从而带动钢丝绳进行牵引(起重)作业。在牵引过程中,须注意钢丝绳在磨芯上不能发生重叠,并要控制尾端拉力,以使工作安全可靠。

目前常用的轻型机动绞磨有SJJ-3型(见图3)和FM型,其主要技术参数如表2。

表 2 轻型机动绞磨主要技术参数

主要技术参数	单位	型 号												
		SJJ-3		SJJ-3A		FM-1		FM-1		FM-1			FM-S	
		快档	慢档	快档	慢档	快档	慢档	快档	慢档	高速档	快档	慢档	快档	慢档
额定牵引力	kN	14.7	29.4	14.7	29.4	19.6	49	19.6	49	12.7	19.6	49	4.9	12.7
牵引速度	m/min	9.5	4	13.5	5.5	10	3.5	14	4	24	14	4	16	6
配套汽油机功率	kW	2.94		4.41 (柴油机)		4.85		7.36		7.36			1.84	
外形尺寸	mm	900×500 ×610		960×500 ×610		1100×525 ×600		1100×684 ×600		1100×686 ×600			530×250 ×300	
整机重量	kN	1.03		1.32		1.27		1.34		1.35			0.34	

(唐兴林)

ganyinglei guodianya

**感应雷过电压** (induced lightning overvoltage) 雷击于导线或电气设备附近时,由于静电和电磁感应在导线或电气设备上形成的过电压。

**形成过程** 在雷云放电的先导阶段,先导通道中充满了电荷,如图 1 (a) 所示,这些电荷对导线产生静电感应,在负先导附近的导线上积累了异号的正束缚电荷,而导线上的负电荷则被排斥到导线的远端。因为先导发展的速度很慢,所以在上述过程中导线的电流不大,可以忽略,而导线将通过系统的中性点或泄漏电阻而保持其零电位。当先导到达附近地面时,主放电开始,先导通道中的电荷被中和,与之相应的导线上的异号束缚电荷得到了解放,以波的形式向导线两侧流动,如图 1 (b) 所示。电荷流动形成的电流  $i$  乘以导

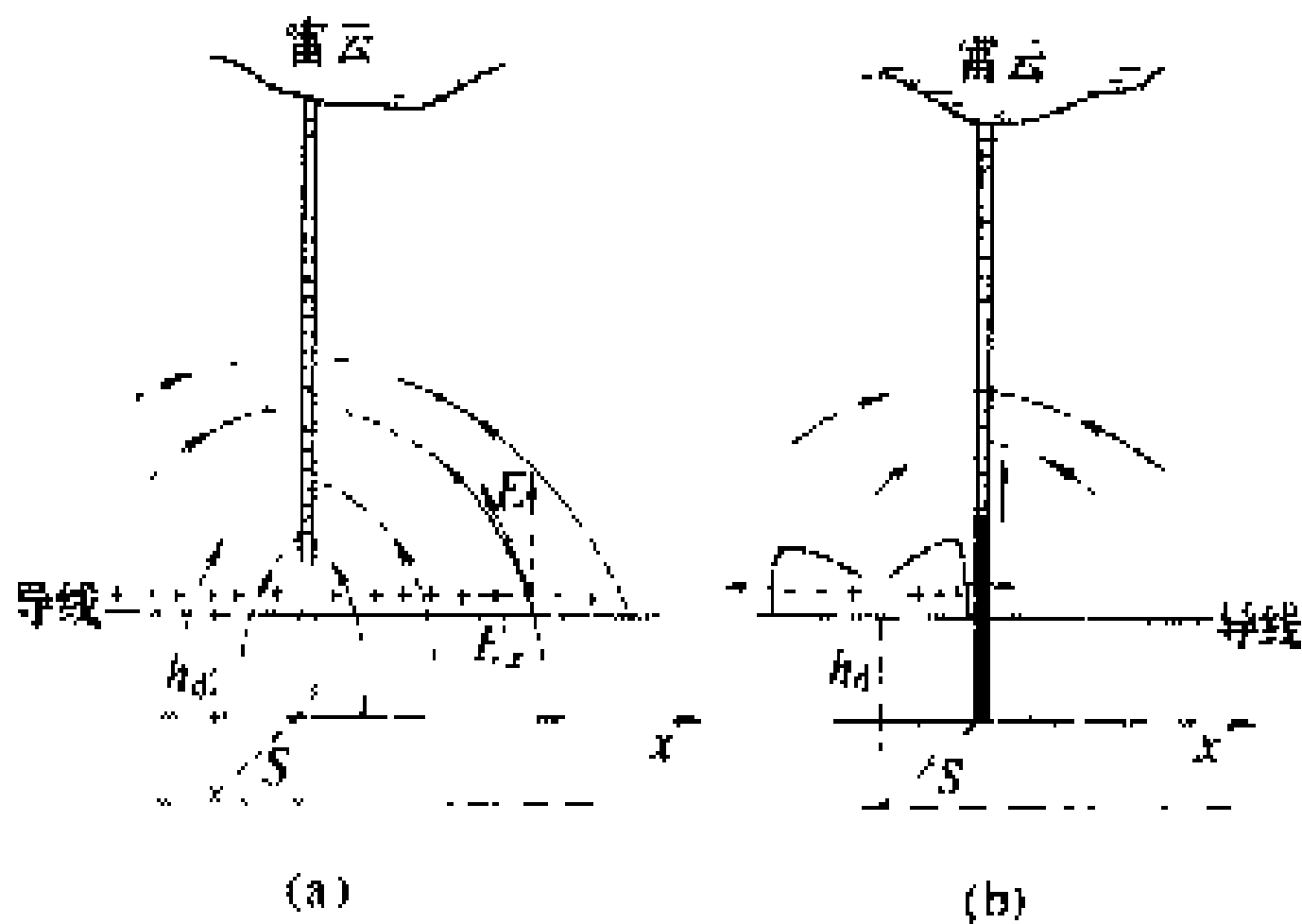


图 1 感应雷过电压的形成  
(a) 先导阶段; (b) 主放电阶段

线的波阻抗  $Z$  即为向两侧流动的静电感应过电压波  $u = iZ$ 。此外, 先导通道电荷被中和时还会产生时变磁场, 使架空导线产生电磁感应过电压波。由于主放电通道是和架空导线互相垂直的, 互感不大, 所以电磁感应分量要比静电感应分量小得多, 约为静电分量的  $1/5$ 。又由于两种分量出现最大值的时刻不同, 所以总的感应雷过电压幅值的构成是以静电分量为

**计算公式** 无避雷线的架空线路导线上的感应雷过电压, 可按式 (1) 估算

$$U_g = 25 \frac{I h_d}{S} \quad (1)$$

式中  $U_g$  为感应雷过电压, kV;  $I$  为雷电流幅值, kA;  $h_d$  为导线高度, m;  $S$  为落雷处距导线的垂直距离, m。上式只在  $S > 65$  m 时适用。更为准确的感应雷过电压值可由图 2 查得。

有避雷线的架空线路导线上的感应雷过电压值, 可按式 (2) 估算

$$U_g = 25 \frac{I h_d}{S} (1 - k) \quad (2)$$

式中  $k$  为导线与避雷线之间的耦合系数。

当  $S < 65$  m 时, 由于迎面先导的作用, 雷将直击于架空线路杆塔顶部, 此时  $U_g$  将受由塔顶发出的迎面先导的限制, 不再能用式 (1)、式 (2) 估算, 而应改用下面式 (3)、式 (4) 估算

$$\text{无避雷线时 } U_g = a h_d \quad (3)$$

$$\text{有避雷线时 } U_g = a h_d (1 - k) \quad (4)$$

式中  $a$  为雷电流的平均陡度, kA/ $\mu$ s。

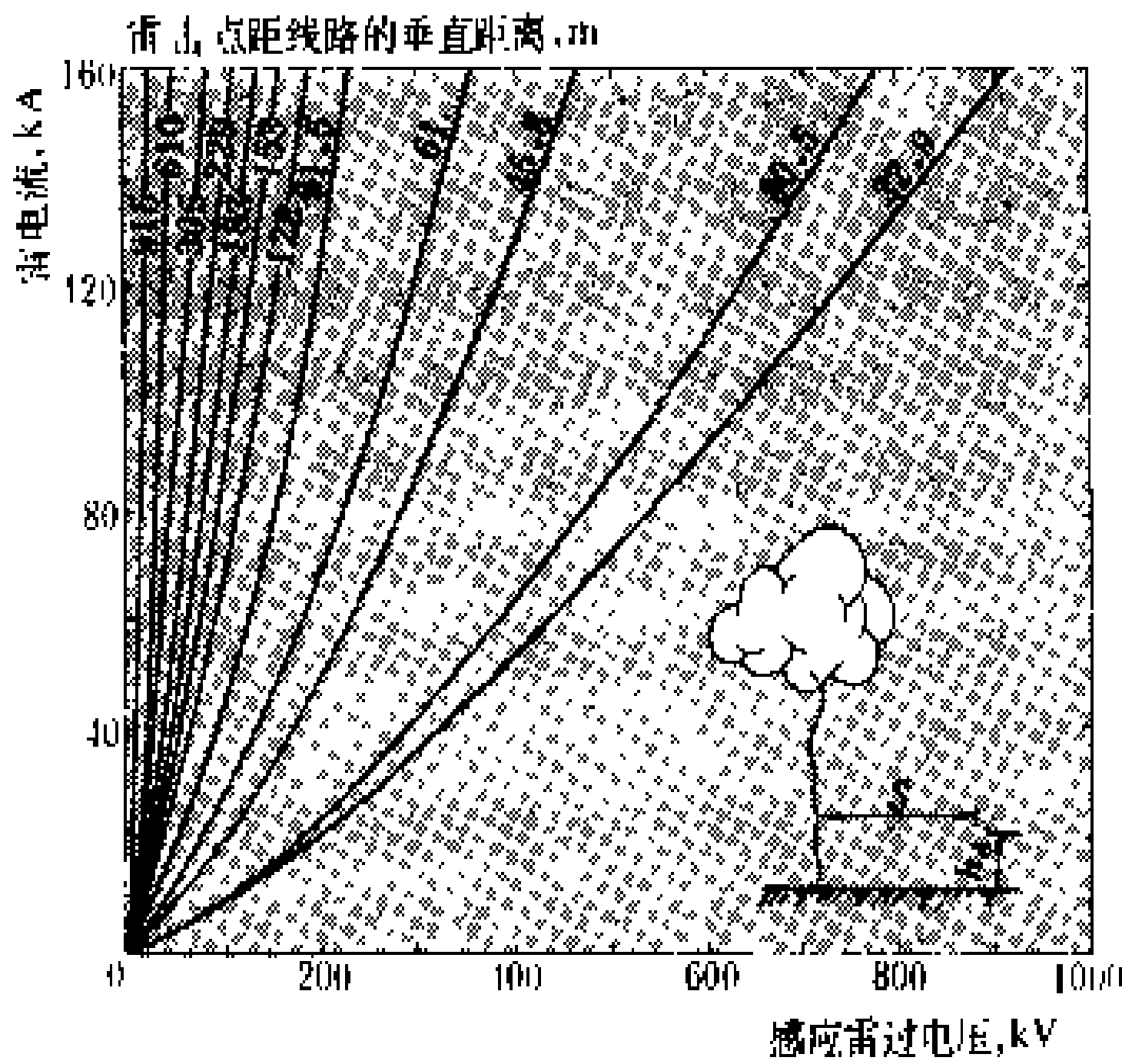


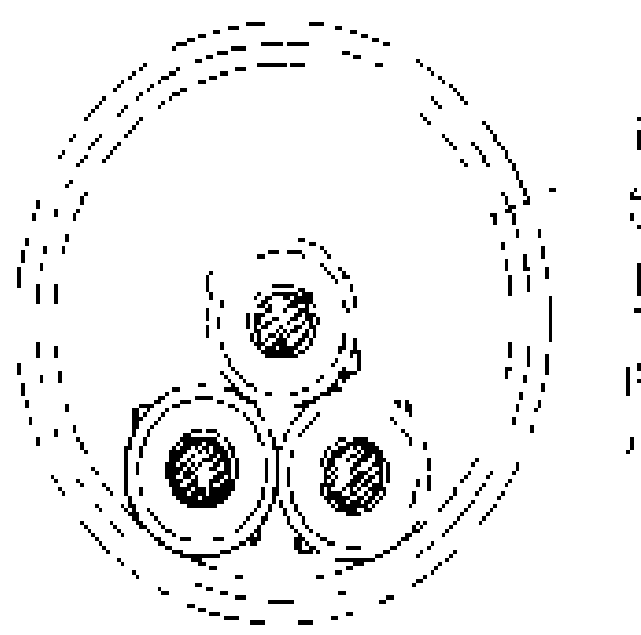
图 2 当架空导线高度  $h_d$  为 7.62 m 时感应雷过电压的计算曲线(当高度为其他值时, 过电压按与高度成正比计算)

(解广润)

gangguan chongyou dianlan

**钢管充油电缆** (pipe-type oil-filled cable)

用钢管作为三根绝缘线芯金属套, 充以高压 (1.5MPa) 的电缆油, 以消除绝缘中气隙, 提高绝缘电气性能的一种电力电缆, 简称 POF 电缆。常用在高电压大容量的电力电缆线路中。钢管充油电缆的结构如图所示。



钢管充油电缆的结构

**钢管电缆油** 为了防止 1—导线; 2—导线屏蔽层; 绝缘油自工厂到现场在运输 3—绝缘层; 4—绝缘屏蔽; 过程中从绝缘层中滴出和绝 5—半圆形滑丝; 6—钢管; 缘层受潮, 早期采用在每个 7—防腐层 绝缘线芯外挤压一层临时铅套, 然后在缆芯拉入钢管时剥去铅套的办法, 现在改用在绝缘线芯外绕包由几层塑料带和金属带组成的防潮层, 装在充以 0.1 MPa 左右压力的干燥气体的密封电缆盘内, 以防止潮气侵入。钢管充油电缆浸渍油的粘度比自容式充油电缆油的粘度高得多, 类似于粘性浸渍纸绝缘电缆的浸渍剂。当用聚丁烯作为浸渍剂时, 其粘度在 20℃ 时为 (1~

2)  $\times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ , 但充入钢管中的油的粘度比浸渍剂粘度低, 在 20℃ 时为  $(0.5 \sim 0.6) \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ , 以减少油在钢管中流动时的阻力。

**半塞止接头** 对于较长的钢管充油电缆线路, 每隔 1~1.5 km 安装一个半塞止接头, 使区段间的油经电缆绝缘层或旁路管道才能相通。这样, 不但可以分段充油, 而且一旦发生故障, 油的流失可限制在一个区段内, 不致影响整个线路。

**油泵站** 钢管充油电缆线路需要大量保持恒定压力的吞吐用油, 因此一般在线路的一侧装设有油泵站 (见充油电缆供油装置), 为了提高电缆的输送容量, 利用油的吞吐, 带走电缆损耗的热量。钢管充油电缆线路经常是成双的, 或则单根钢管充油电缆, 在其旁另敷设一根回油钢管, 利用油泵站的循环泵和冷却装置, 驱使油的不断流动, 及时散发热量。供油设备集中管理, 维护比较方便。

**发展情况** 钢管充油电缆早期因所采用的油尚未发展成为强迫循环冷却介质, 被称为静油电缆。其后, 油发展成为冷却剂, 才称作钢管充油电缆。在美国用量最多的钢管充油电缆其最高电压等级为 345 kV, 累计线路长度达 170 km。苏联也已在 550 kV 系统中采用钢管充油电缆运行。但这种电缆限于油的用量较大, 并需用大量的无缝钢管, 电缆终端结构也比较复杂, 在多数国家并不发展。

参见彩图插页第 29 页 91 图。

参考书目

郑肇骥, 王焜明主编, 高压电缆线路, 北京: 水利电力出版社, 1983

刘子玉, 电气绝缘结构设计原理, 北京: 机械工业出版社, 1981

(桑纪明)

gangguan dianlan

**钢管电缆** (pipe-type cable) 用钢管作为三根绝缘线芯金属套的电力电缆。钢管内充以高压力的油或气体, 以消除绝缘中的气隙, 提高绝缘的电气性能, 其压力范围为 1.4~1.5 MPa。钢管电缆又以其充入压力介质的不同, 分为钢管充油电缆和钢管压气电缆, 一般都用在 66kV 及以上电缆线路中。

钢管电缆的优点是具有良好的机械性能, 不易受外力破坏, 并节省大量有色金属, 占用的线路走廊也小。此外钢管充油电缆还便于采用强迫冷却, 以提高输送容量。钢管电缆的缺点是当一相发生故障时, 往往会损害其他两相和钢管, 安装敷设也较复杂, 而且不宜用于高落差场合。

钢管电缆通常用每节约 12 m 长、内径为 150~

200 mm 的无缝钢管焊接而成, 每段管道长度一般为 350~750 m。为了便于拉入电缆线芯, 钢管的内壁非常光滑, 并涂有防锈漆 (如聚苯乙烯漆)。钢管的壁厚通常为 4.5~6.25 mm, 视敷设条件而定, 但用于水底或隧道时管壁厚增至 10~12 mm。埋设在地下的钢管电缆, 管道外都有防腐层。此外, 为了避免电化学腐蚀, 钢管电缆均采取阴极保护。

钢管电缆中最先发展的是钢管充油电缆, 并在美国、日本等国得到大量应用。以后又发明了钢管压气电缆。但由于这种电缆都需要大量钢材并且安装难度较高, 建设工期长, 因此, 除了易于采用强迫冷却能够极大提高输送容量的钢管充油电缆以外, 用气体作介质的钢管压气电缆已基本被淘汰。

参考书目

郑肇骥, 王焜明主编, 高压电缆线路, 北京: 水利电力出版社, 1983

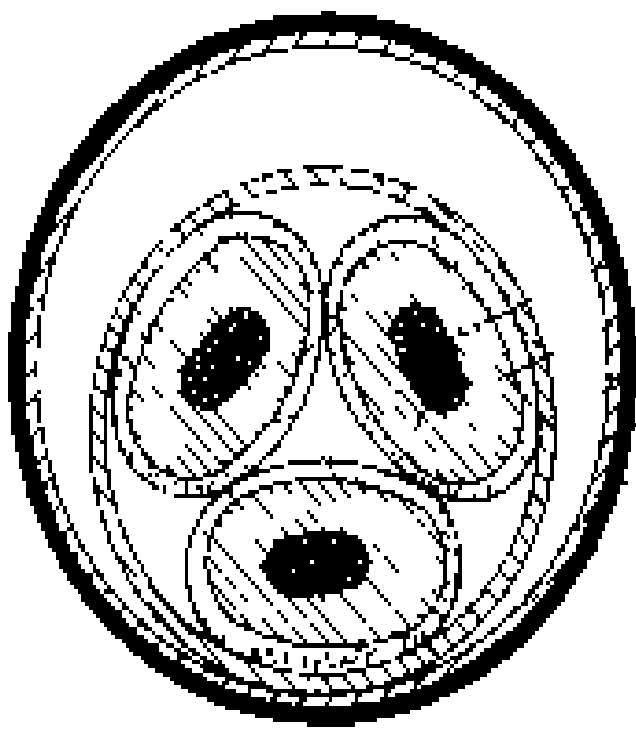
刘子玉, 电气绝缘结构设计原理, 北京: 机械工业出版社, 1981

(桑纪明)

gangguan yaqi dianlan

**钢管压气电缆** (pipe-type gas compression cable) 以钢管作为电缆的金属套, 将三根带有铅套或塑料套的绝缘线芯拉入钢管中, 管内充以高压 (1.5 MPa) 的氮气, 以消除铅套内绝缘层中的气隙, 提高绝缘电气性能的一种电力电缆。常用在防火要求较高、输送容量较大、电压等级为 132 kV 及以上的电力电缆线路中。

图示为分相铅包型钢管压气电缆结构。



分相铅包型钢管压气  
电缆结构

1—线芯; 2—绝缘; 3—铅套;  
4—绝装; 5—钢管; 6—防腐层

钢管压气电缆芯的导体一般为椭圆形, 绝缘层相似于普通粘性浸渍纸绝缘电缆的绝缘层, 铅护套的主要作用是作为传递压力的隔膜。当电缆因负荷变化膨胀或收缩时, 椭圆形隔膜比圆形隔膜耐疲劳, 不易开裂。以塑料护套作为传压隔膜时, 通常采用加强带加固, 虽然在长期运行后, 可能会有微量气体透过塑料护套进入绝缘层中, 但对绝缘性能没有显著影响。

用高压气体提高绝缘性能的电缆, 由于其油纸绝缘的介质损耗因数不易改善等缺点, 在其它绝缘材料电缆不断改进的同时, 无法竞争, 因此在 20 世纪 60 年代后, 被逐渐淘汰。

参见彩图插页第 29 页 92 图。

(桑纪明)

gaodianya celiang zhuangzhi

**高电压测量装置** (high voltage measurement devices) 通常可分为两类:一类是直接测量高电压的仪器或装置,另一类是通过某些中间环节将高电压转换成低电压,并以低电压测试仪器仪表进行测量的装置。不同的装置可分别用来测量直流、交流和冲击电压的电压值和波形。国际电工委员会(IEC)和中国国家标准都规定了高电压测量装置的测量误差应不大于 $\pm 3\%$ 。常用的装置有:测量球隙或棒间隙,高压静电电压表,以及由互感器、测量用高阻抗元件、分压器等中间环节和低电压测试单元组成的高压测量系统。

**测量球隙或棒间隙** 测量球隙是一对直径相同的金属球。由于均匀电场空气间隙的放电电压与间隙距离有一确定的关系,根据球径和球距的大小即可查知被测电压的峰值。球隙既可测定交流电压和冲击电压的峰值,也可测出直流电压的最大值。现行标准中,球径最大的 2 m 球隙可测的最高电压为 2 MV。当球隙的结构和布置符合有关标准的规定时,用它测量交流和冲击电压的准确度为 $\pm 3\%$ ,而测量直流电压的准确度为 $\pm 5\%$ 。

棒间隙由一对截面为方形的金属棒组成。IEC 新标准推荐使用棒间隙测量直流电压,其准确度为 $\pm 2\%$ 。

使用球间隙或棒间隙测量高电压时,应进行相应的空气密度修正。(见高压电力设备绝缘试验)

**静电电压表** 利用相对的两个电极之间作用的电场力来测量电压的仪表,由一对作为电极的金属板和一些零部件组成。当被测电压加到电极上时,电极间的静电场作用力与电压有效值成正比,测出这个力的大小或电极位置的偏移就可得出施加在电极上的电压值。静电电压表可测量交流电压的有效值和直流电压的平均值,不能测量冲击电压的峰值。实验室中常用的高压静电电压表需用其它表计进行校准和刻度,准确度为 $\pm (1\sim 3)\%$ 。还有一种绝对静电电压表,它是通过测量电极间的作用力,再根据极间距离和极板面积直接计算出被测电压值,无需用其它表计来校准。现有最高量程达 275 kV、准确度达 $\pm 0.01\%$ 的绝对静电电压表。

静电电压表可以单独使用,与分压器组合起来后,还能扩大测量范围。

**电压互感器** 可在其二次侧配置低压电压表,只用于交流电压有效值的测量。(见电压互感器)

**测量用高阻抗** 一种用于测量并能承受全部被测电压的高阻抗元件。它与电流表串联组成高压测量系统,从已知的阻抗值以及测得的电流值即可算出被测电压值。测量直流电压的高阻抗元件为电阻器,测量交流电压时用电容器。

**电阻器** 它与直流电流表串联组成直流高压测量系统,用于直流电压平均值的测量。一般按全电压下流过的电流不小于 0.5 mA 来选择电阻器的阻值。电阻器的阻值应稳定不变。该系统的量程可从数千伏到数百万伏。当测量较高电压时,其顶部应有屏蔽,避免电晕放电造成测量上的附加误差。

**电容器** 将电容器和整流电路串联接于被测电压的两端,通过测量流经电容器的电流的平均值可以得出被测交流电压的峰值。该电容器性能应稳定,损耗要小。IEC 和中国国家标准都规定交流电压的峰值除以 $\sqrt{2}$ ,作为衡量电介质短时击穿强度的尺度,因而这种测量回路在介质击穿或耐受试验中得到广泛应用。

**分压器** 由两个(组)特性相同的阻抗元件(电阻器、电容器或电阻-电容元件的组合)串联组成。与高压端相连接的元件称为高压臂,与接地端相连接的元件称为低压臂。高压臂与低压臂阻抗值之和与低压臂阻抗值的比值称为分压比。测出低压臂上的电压,乘以分压比即可求出高压端的电压值。标准规定,分压器的分压比误差不得大于 $\pm 1\%$ ,并对应于被测电压的类型应具有一定的响应特性。分压器按用途不同可分为直流分压器、交流分压器和冲击电压分压器三种,按元件类型不同可分为电阻式、电容式和阻容式三种。

**直流分压器** 由二个(组)电阻元件构成,通常用一高阻抗电压表测量低压臂上的电压。

**交流分压器** 有电阻式、电容式两类。电阻式的由无感电阻元件构成,只适合于测量频率不高、几十千伏以下的交流电压。电容式的由电容元件构成,它基本上不消耗功率,可用于较高电压的测量,应用较为广泛,测量电压的范围从数千伏直至数百万伏。

**冲击分压器** 冲击电压是一种变化快、谐波分量多的非周期脉冲电压。为准确地测定其波形和幅值,要求冲击分压器具有良好的响应特性。冲击分压器的类型有电阻式、电容式和阻容混和式三种。电阻式的由无感电阻元件构成,一般用于测量幅值不超过 2 MV 的雷电冲击电压。低阻值、小尺寸的电阻分压器具有良好的响应特性,还可以作为校验其它分压器的基准,也适用于电压不很高的陡波前冲击电压的测量。电容式的由若干电容元件串联构成,只适合于电压不高、波前较缓的冲击电压测量。阻容混和式的由无感电阻和电容元件组成,又分为串联式和并联式两种。串联式也称



为阻尼型分压器,其串联电阻分配在每个电容器之中,又分为高阻尼和低阻尼两种。高阻尼分压器只能当作分压器使用,不能兼作冲击电压发生器的负荷电容;低阻尼分压器属通用型,可测量雷电冲击全波、截波和操作冲击波,还可以测量交流电压,并可兼作冲击电压发生器的负荷电容,应用较为广泛。

**低电压测试仪器和仪表** 可分为两类:一类是测量稳态电压(交流和直流电压)的标准电工仪表和通用示波器等(见电气测量仪表);另一类是测量暂态量(如冲击电压)的冲击示波器、冲击峰值电压表和数字记录仪等。

**冲击示波器** 一种能与冲击信号同步触发的单次扫描的显示仪器,具有性能稳定,屏蔽良好,记录速度高的特点。

**冲击峰值电压表** 一种用于记录冲击电压峰值的仪器,具有屏蔽良好,性能稳定的特点。

**数字记录仪** 一种将模拟量信号转换成数字量信号的测量仪表,也称为暂态记录仪,带有内显示屏幕的则可称为数字式示波器。它和微机联用可适时显示被测信号在各个点的电压和时间值,显示波形并给出波形的特征参数。还可以采用波形重建技术,推算出高压侧的原始波形。近年来,数字记录仪在高电压冲击测量中得到日益广泛的应用,由于其分辨率高,在变压器的冲击示伤试验中用它可作出较好的判断。

参考书目

[英]施瓦伯著,高电压测量技术,屈东海,郑健超等译,北京:电力工业出版社,1982

(Adolf J. Schwab. High - Voltage Measurement Techniques. London: MIT Press, 1972)

(王 来)

gaodianya shiyanshi

高电压实验室 (high voltage laboratories)

进行高压电力设备绝缘试验,研究交、直流高压、超高压、特高压输电中高电压技术问题的试验设施。其主要任务是:①按照标准规定对高压电气设备绝缘和过电压保护设备特性进行考核试验;②为研制新的高电压设备、发展新的输电电压等级及保证电力系统安全运行而进行研究性试验。由于高电压情况下影响绝缘特性的因素较多而且复杂,并具有统计性,许多高电压现象不能单靠理论计算或用缩小的模型试验来分析,而必须进行1:1的原型试验。因此,高电压试验是发展新的输电电压等级和保证电力系统安全运行必不可少的研究手段。

高电压实验室通常包括户内及户外两部分,即高电压试验厅和户外高电压试验场。前者试验可不受天

气变化的影响,但受场地限制,有些大型试验难于进行。一个高电压实验室可能两部分都有,也可能只有其中之一。另外,在苏联和美国,为了适应工程的要求,还曾建有工业性试验线路和试验性变电站。

高电压实验室一般均装备有不同额定参数、不同种类的多套高压电源装置,包括工频试验变压器、冲击电压发生器、直流高电压发生器、冲击电流发生器及相应的高电压测量装置和试验辅助设施。在进行特定的试验时,还要有特殊的辅助设施。例如,为进行瓷外绝缘湿试验,需要有人工淋雨装置;研究在污秽地区运行的外绝缘特性,需要有雾室(见人工污秽试验);研究不同海拔高度、温度、湿度、覆冰等因素对绝缘的影响时,需要建立可以调节气压、温度、湿度等参数之一项、数项直至全部项的环境试验室。

一个高电压实验室的水平主要以其电压最高的试验设备的额定电压来表征,它随着被试品额定电压的提高而成比例地提高。20世纪60年代以来,由于发展超高压和特高压输电的需要,很多国家都先后建立了可以进行500~1500 kV级输电技术研究的高电压实验室,其中具代表性的有:加拿大魁北克水电局研究所高压实验室、意大利电工技术试验中心高压实验室、法国电力公司高压实验室、苏联列宁格勒国立工业大学高电压实验室、中国武汉高压研究所高压实验室等。这些实验室的试验变压器额定电压为2000~2250 kV,冲击电压发生器标称电压为5400~7000 kV,直流高压发生器的额定电压最高可达2000 kV或±1200 kV。

**高电压试验厅** 在户内进行高电压试验的设施。厅的尺寸由试验设备的最高电压决定。其优点是试验受气象条件变化的影响小,便于常年进行试验;可遮光,便于在暗中观察放电现象与摄影;可以对整个试验厅采取电磁屏蔽措施(见高电压实验室屏蔽),减弱或消除厅内、外的相互干扰(这对在厅内进行局部放电试验尤为必要)。其缺点是进行大尺寸试品的试验时,厅的墙壁影响试品周围的电场分布,增加试验误差(例如在厅内做整基铁塔外绝缘试验,很难反映真实状态);在厅内不能架设试验线段;试验设备电压越高,厅的尺寸要求越大,其造价也随之提高;一旦建成,难以再扩展。

**户外高电压试验场** 在户外进行高电压试验的设施。高压试验设备可固定安装于户外,也可在试验时临时由户内移出。其优缺点与高电压试验厅的完全相反。主要优点是造价较低,可进行整基真型铁塔试验,可以架设试验线段。主要缺点是试验受户外气象条件影响大(天气恶劣时甚至无法进行试验),无法屏蔽,也难

于避免干扰, 试验数据重复性差。

**工业性试验线路和试验性变电站** 一个新电压等级出现之前, 按照将要建设的方案先建成的一段线路, 称为工业性试验线路。它是实际整个线路工程的一部分, 既通过它输送电力, 又用它来研究线路的结构及参数, 积累施工和运行经验。有时, 将新研制的电气设备集中安装到一个变电站, 作为试验性变电站, 带电试运行, 以便在更接近实际运行的条件下, 对设备和线路进行考核。

(杨吟梅)

gaodianya shiyanshi jiedi

**高电压实验室接地** (grounding of high voltage laboratory) 为保证高电压实验室内试验安全和测量准确, 通过接地装置将试验设备、被试设备以及试区内不带电金属部件与大地进行连接的技术措施。接地装置是埋于地面下的金属接地体和设备与接地体间连线的总称。通常, 将设备与接地装置相连, 即称为接地。

**工作接地和保护接地** 根据不同的目的, 高电压实验室接地分为工作接地和保护接地两种。高压试验回路至少须有一点接地, 以固定电位并限制高压部分和周围物体间的电位差, 这种接地称为工作接地。将试验室内在正常情况下不带电的金属部件(如安全围栏、暖气片、各种金属管路、仪器设备的外壳等)接地, 以防止由于感应或设备带电部分对外壳的绝缘破坏时, 在这些部件上出现危及人身、设备安全的高电位, 这种接地称为保护接地。通常, 工作接地和保护接地可以共用一个接地装置, 也可以接到不同的接地装置上。

**基本技术要求** 当试验回路电压发生变化, 尤其是当被试品放电时, 便会有电流流过接地装置和大地, 使接地装置的电位升高, 同时接地装置上各点间出现电位差。这会导致接地设备的外壳电位也随之有不同程度的升高, 甚至可能引起设备外壳对其电源线或其他处在不同电位的部分之间放电(见反击)。接地装置电位升高还会使与之相连的测量电缆屏蔽层中流过噪声电流, 该电流产生的噪声电压叠加在被测信号上, 构成共模干扰。为了防止反击和减小共模干扰, 需要降低接地装置的阻抗(见冲击接地阻抗), 减小地中电流。

**接地装置** 高电压实验室的接地体通常是采用长2~3 m、直径50 mm左右的镀锌钢管, 垂直打入土壤中, 管数决定于所要求达到的接地电阻值(通常要求不大于0.5Ω), 钢管顶端埋在冻土层下面。钢管排成4~6 m的方阵, 并用厚4~5 mm、宽40~50 mm的镀锌

钢带纵横相连, 遍布于试区地面下。

为了减小地中电流, 不应该用大地作为试验回路的接地回线, 而应在地面上敷设铝板或铝带作为回线, 该线只有一点接地。这样, 主放电电流不流过接地装置, 但试验回路的高压部分对墙壁及铝板以外的地面有杂散电容, 仍将有一小部分放电电流通过杂散电容流经接地装置, 导致接地装置上各点间的暂态电位差。为减小这一暂态电位差, 需要降低接地装置的阻抗。常见的做法是用铜板拉网或钢板拉网做接地网, 并兼作放电电流的回线。

现代大型高电压实验室常建成全屏蔽的(见高电压实验室屏蔽), 这样使得整个实验室均在法拉第笼中, 流经杂散电容的电流, 全部在笼上面自成回路, 不再流经接地装置。这时, 实验室的接地可按一般建筑物防雷要求设计。

**测量系统的接地** 为减小共模干扰, 测量系统接地的原则是:

(1)减小接地网上的电位差。若实验室地面下未敷设接地网, 可在地面上沿主放电电流回路及测量电缆敷设金属板, 将各试验设备接地端连接在一起。

(2)减小外界电磁场对测量电缆的感应。测量电缆与接地网之间包围的面积要尽可能小, 两者要尽量靠近, 电缆应在接地网下。若未敷设接地网, 可在分压器与示波器间放置金属板(带)并接地, 测量电缆在其下面通过。

(3)分压器接地线应尽量短。可将分压器放在接地体引出端子旁, 用宽铜带连接。

见接地。

(杨吟梅)

gaodianya shiyanshi pingbi

**高电压实验室屏蔽** (shielding of high voltage laboratory) 用金属网或板敷设于高电压实验室的墙体、屋顶及地下, 构成一个接地的封闭体, 以减弱透过的电磁波强度的技术措施。屏蔽的主要目的是防止附近电台或其它设备产生的电磁波对实验室内局部放电试验回路等弱信号测量系统产生干扰, 影响测量结果, 同时也为了防止实验室内高压设备放电时产生的电磁波干扰外界通信或其它电子设备等的正常工作。通常也将这种对电磁波起衰减作用的接地的金属网(板)泛称为屏蔽。

**屏蔽作用** 透过金属屏蔽层的电磁波强度被减弱的作用。电磁波入射到金属表面, 产生反射损耗和吸收损耗, 因而透过的电磁波强度被衰减。这种衰减作用也可认为是由于高频电磁场在金属屏蔽层中产生感应电动势, 引起涡流, 涡流产生的磁场与原始磁场方向相

反，起到抵消作用。

**屏蔽方法** 屏蔽的材料、结构及工艺对屏蔽效果影响很大。屏蔽材料以铜材最佳，镀锌钢材次之。板比网好，但为节约造价，大多用镀锌铁板或网。如果用板，则可以同时用它作为实验室的内墙和天花板。为了减弱实验室内回声，板上设有吸音孔。用网时，一般均用钢板拉成的网，编织网屏蔽效果差，不宜采用。网敷设于墙体内、天花板上及地面下。各片网（或板）接缝处一定要焊好，最好采用连续焊。封闭的屏蔽层构成一个大法拉第笼，一点接地（见高电压实验室接地）。实验室门窗均采用金属的，并要采取特殊的连接措施，将它们与墙内的金属网（板）电气上良好连接。如果单层屏蔽达不到要求的效果，可以采用双层屏蔽。

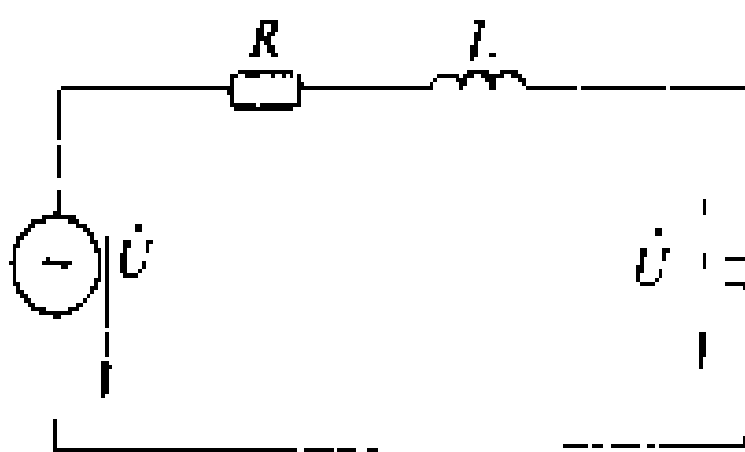
一切进出实验室的金属管道都应 与屏蔽网（板）电气上良好连接。进入实验室的电源线需经隔离变压器或滤波器相连接，以防止将外界干扰引入。

（杨吟梅）

gaodianya xiezhen shiyan zhuangzhi

**高电压谐振试验装置** (high voltage resonant circuit) 利用电容电感谐振的原理获得高电压（串联谐振）或大电流（并联谐振）的一种高压试验装置。由于回路中电容与电感的无功功率互相补偿，从而可以得到比电源更高的电压或更大的电流。高电压谐振试验装置多用于电容器、电力电缆、SF<sub>6</sub> 气体绝缘电气设备等电容量较大而泄漏电流较小的被试物的绝缘试验，也可用于其它电气设备的试验，但不宜用于外绝缘的湿试验和外绝缘的人工污秽试验。

**基本原理** 串联谐振试验装置原理如图所示。当电感与电容参数完全匹配，即  $\omega L = 1/(\omega C)$  时，电感的滞后无功功率全部补偿了电容的超前无功功率，电源输出的无功功率为零，电源只供给有功功率  $P = U^2/R$ 。此时，流过被试品 C 和电感 L 的电流最大，即  $I_c = U/R$ ，而被试品上的电压为  $U_c = U/(R\omega C) = U\omega L/R$ ，令  $Q = 1/(R\omega C) = \omega L/R$ （称为品质因数），则  $U_c = QU$ ，通常  $Q \gg 1$ ，则  $U_c \gg U$ 。因此，可利用较低的电源电压提供较高的试验电压。品质因数 Q 是高电压谐振试验装置的重要参数。



串联谐振回路原理图

$\dot{U}$ —电源电压； $L$ —补偿电感； $R$ —回路损耗等值电阻； $C$ —被试品电容

电感与电容参数完全匹配，即  $\omega L = 1/(\omega C)$  时，电感的滞后无功功率全部补偿了电容的超前无功功率，电源输出的无功功率为零，电源只供给有功功率  $P = U^2/R$ 。此时，流过被试品

对电容量较大而试验电压不太高的被试品，通常可与被试品并联补偿电感，使电感电流与电容电流互相抵消，从而可利用较小的电源提供较大的被试品电流。

**主要特点** 可归纳为：①较小的电源容量可提供较大的输出容量；②谐振频率就是电源频率，可以抑制其它高频分量，从而可得到很好的正弦波形；③串联谐振试验装置在被试品击穿后回路立即脱谐，短路电流被补偿电感限制，不易损坏被试品；④由于电源容量减小且电感可做成分段式，使设备轻巧，运输方便，适于现场试验。

利用谐振试验装置进行高电压试验是经济、有效的办法。中国从 20 世纪 60 年代初期开始使用。近 30 年来，国内外这方面的技术发展较快，很多大型实验室都装设了串联谐振试验装置，现场试验中使用得也较多。

参考书目

华中工学院，上海交通大学合编．高电压试验技术，北京：水利电力出版社，1982

（王如璋）

gaosu sheyingji

**高速摄影机** (high speed cameras) 用来拍摄快速发展的光学过程照片的摄影机，是研究雷电发展过程的重要工具之一。目前广泛采用的机械式高速摄影机，从结构上可分为鼓轮型和转镜型，从拍摄功能上可分为轨迹记录（扫描）式和连续分幅式。对于雷电这种不可控的自然现象，高速摄影机是以等待方式工作的，即在一定的时间范围内，摄影机的快门始终开启，记录可以从任何瞬间开始。

最早拍摄雷电高速照片的波依斯相机是一种鼓轮型扫描式高速摄影机，如图 1 所示。胶片固定在鼓轮

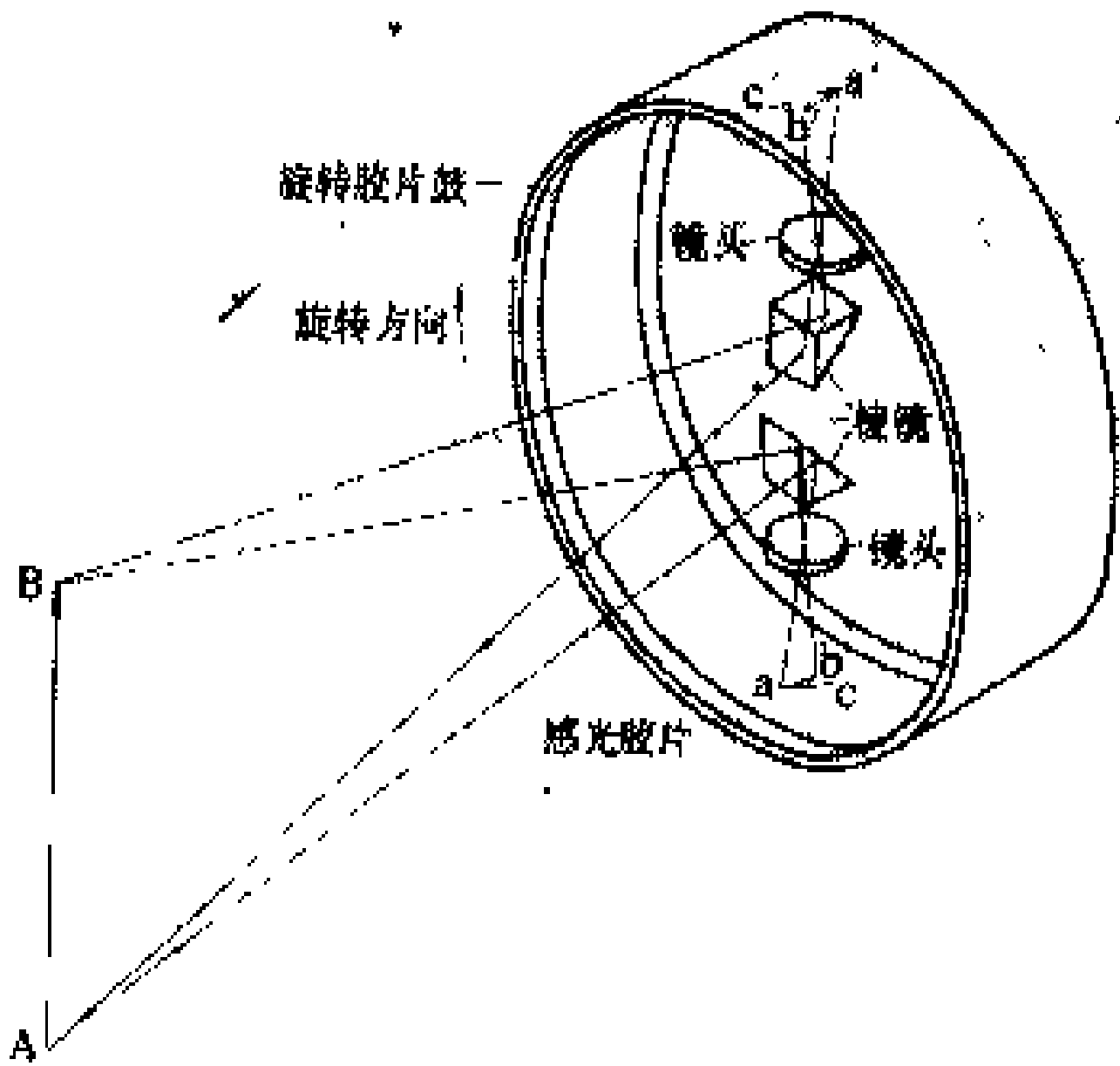


图 1 鼓轮型相机的工作原理

内表面，接成环形。当鼓轮高速旋转时，离心力使胶片紧贴鼓轮，转速的极限取决于鼓轮的强度，其最高旋转



线速度可达 100 m/s, 拍摄频率达每秒  $10^5$  幅。波依斯相机具有两套固定的三棱镜与透镜, 可在胶片上形成闪电 AB 的两个像 ac 与 a'c'。当鼓轮高速旋转时, 由 A 向 B 发展的放电前沿将在胶片上形成逆着鼓轮旋转方向倾斜的扫描轮廓, 根据轮廓的斜率可求出放电发展的速度。连续分幅式的鼓轮型相机可以形象地记录雷电完整的发展过程, 其光路比波依斯相机复杂。为了形成尽可能清晰的闪电整体分幅照片, 在画幅曝光时间内, 像与胶片间要相对静止, 这就必须采取补偿措施。鼓轮型相机广泛应用反射镜补偿, 被摄目标的像经一系列透镜后在一个转速为鼓轮的整数倍的多面体反射镜上形成中间像, 再经过中继透镜系统在胶片上形成相对静止的像。多面体反射镜既补偿了胶片运动, 同时还起到光学快门的作用。

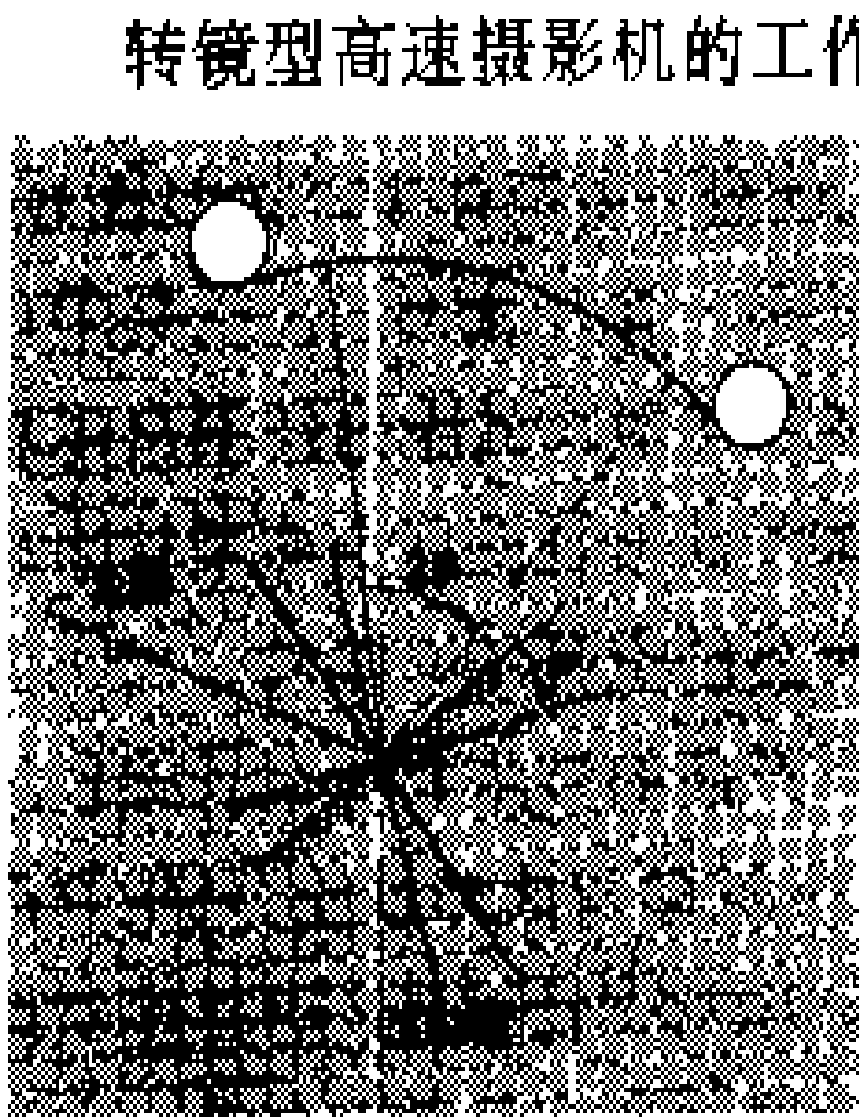


图 2 转镜型相机的工作原理

转镜型高速摄影机中胶片是固定在某一位置的, 光线经透镜系统进入相机, 由反射镜反射到胶片上。当反射镜依箭头方向旋转时, 反射角同时发生变化, 胶片上的感光点随之移动。旋转反射镜(转镜)的转动惯量很小, 又可通过抽真空等办法减少阻力, 故

可以比鼓轮旋转速度高得多。同时由图可见, 反射光线的旋转角速度为镜面旋转角速度的 2 倍。转镜型相机的光线扫描速度可达 50 km/s, 分幅拍摄频率达每秒  $10^7$  幅以上。

除上述两种高速摄影机外, 有些国家还使用旋转胶片的高速摄影机, 这种高速摄影机的胶片是环形的, 其最高旋转线速度为 50 m/s。

(雷经煌)

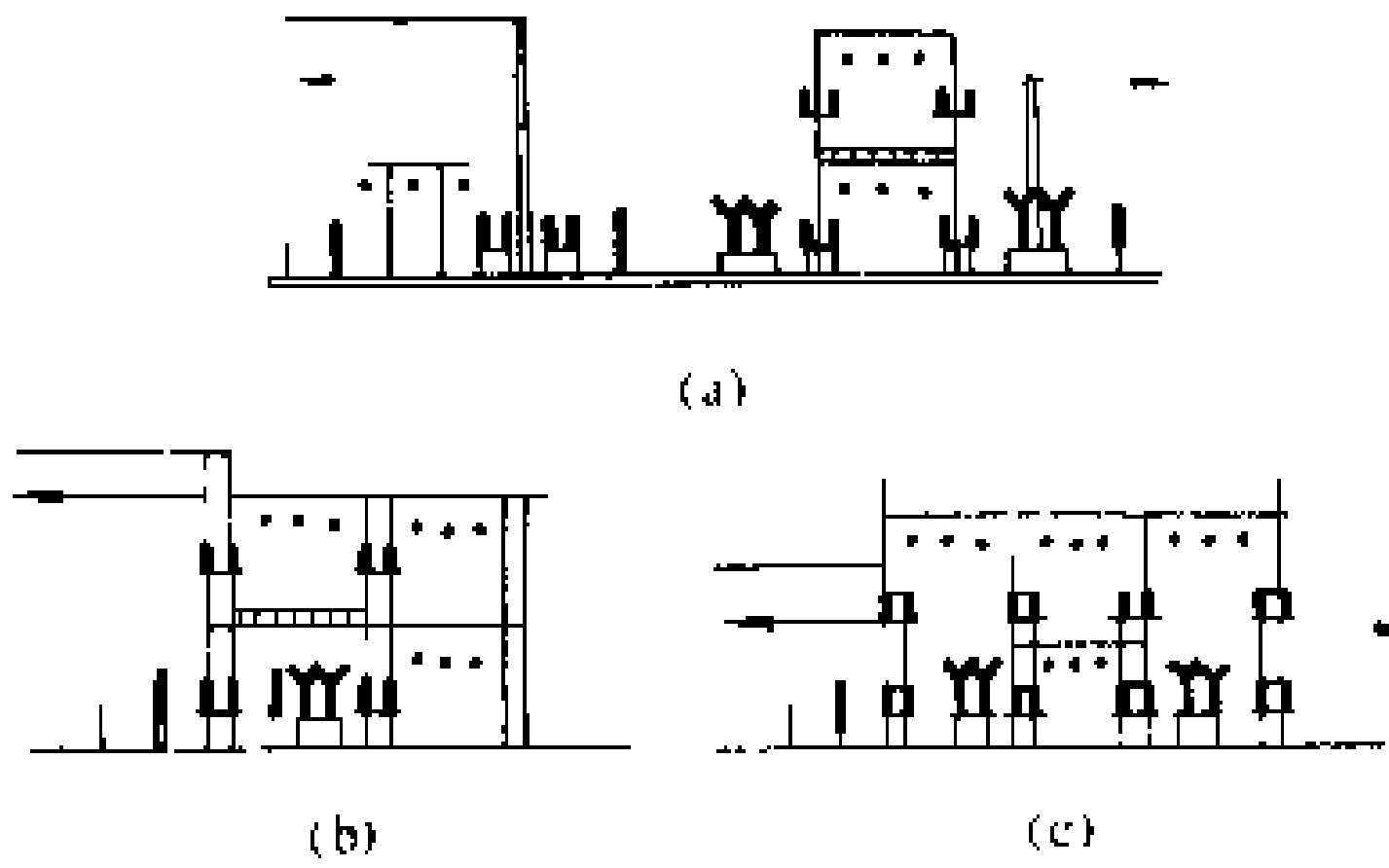
gaoxing wuwai peidian zhuangzhi

**高型屋外配电装置** (high - arrangement of outdoor switchgear) 将两组母线上下两层重叠布置的屋外配电装置。其特点是: ①两组母线下面没有电气设备, 进线和出线断路器都布置在母线的外侧; ②母线隔离开关均上下布置在母线的两侧; ③可以将两个回路布置在一个间隔内向两侧出线, 能减少占地。

高型屋外配电装置的优点是设备布置紧凑, 控制电缆、导线和绝缘子使用较少。由于设置了高位布置隔离开关的操作走道层, 方便了巡视、操作、测试和检修。

其缺点是钢材消耗较多, 上层设备检修较困难。采用这种布置方式的关键是要解决好上层母线检修、上层母线隔离开关操作检修、上层隔离开关引下线方式、搬运道路、起吊设施和土建结构等问题。

在中国, 高型屋外配电装置已有了单框架双列式、单框架单列式和三框架双列式等多种不同结构的布置型式(见图), 钢材消耗量逐步减少, 上层母线和隔离开关检修条件得到较大改善, 从而使高型屋外配电装置在人多地少的地区和场地面积受到限制的工程中得到应用。



高型屋外配电装置的型式

(a) 单框架双列式; (b) 双框架单列式; (c) 三框架双列式

单框架双列式高型屋外配电装置, 是将双母线接线中的两组主母线及其隔离开关上下重叠布置在一个高型框架内, 断路器在母线两侧双列布置, 旁路母线的高度不变[见图(a)]。双框架单列式是将旁路母线架设在断路器的上方, 断路器单列布置, 同时两个高型框架合并为双框架结构[见图(b)]。三框架双列式是除将两组主母线及其隔离开关上下重叠布置外, 再将进线和出线的两条旁路母线架构高度提高, 并列在主母线框架两侧, 三个高型框架合并成三框架结构, 断路器在旁路母线下双列布置[见图(c)]。在上述三种结构型式中, 三框架结构比单框架和双框架结构更能充分地利用空间, 又可双侧出线, 占地面积更小。

高型屋外配电装置主要用于 110kV 和 220kV 电压等级。220kV 三框架双列式高型屋外配电装置在中国的华中、华南、西南和华东地区均有使用。110kV 高型配电装置和半高型配电装置相比, 由于母线和隔离开关高度需提高, 还需设置结构复杂的上层操作走道, 增加了钢材消耗, 所以 110kV 高型配电装置使用很少。

(戈东方)

gaoya dianli shebei jueyuan shiyan

**高压电力设备绝缘试验** (insulation tests of high voltage electric power equipment) 检



验高压电力设备绝缘特性的各种高电压试验的总称。按设备在电力系统中可能承受的作用电压、设备的绝缘类型、设备所处周围环境条件以及设备在制造与使用的不同阶段,各类标准中规定了相应的试验项目和试验条件。(见输配电技术标准)

**作用电压与试验分类** 电力设备在运行中可能受到工频运行电压、暂时过电压、操作过电压和雷电过电压的作用。为了检验设备在各种电压作用下的绝缘特性,标准中规定了相应的试验项目,通常有交流电压试验、冲击电压试验和直流电压试验。

**交流电压试验** 包括额定工频耐受电压试验、长时间工频电压试验、破坏性放电试验、局部放电试验。主要用于检验电力设备在工频运行电压、暂时过电压以及额定电压为 300 kV 以下的设备在操作过电压作用下的绝缘性能。(见交流电压试验)

**冲击电压试验** 包括雷电冲击试验和操作冲击试验。分别用来检验电力设备在雷电过电压和额定电压为 300 kV 以上的设备在操作过电压下的绝缘性能。雷电冲击试验又分为雷电冲击全波、雷电冲击截波和陡波前冲击试验。操作冲击试验又分为标准操作冲击试验和非标准操作冲击试验。雷电和操作冲击电压试验均分为额定耐受电压试验和 50% 破坏性放电电压试验。(见冲击电压试验)

**直流电压试验** 包括耐受电压试验、极性反转试验、破坏性放电试验、泄漏电流试验和局部放电试验。主要用来检验直流输电设备的绝缘性能。由于设备绝缘在直流电压作用下只流过泄漏电流,可以使用较小容量的试验设备,所以直流电压试验也常用于检验容量较大的交流电力设备的绝缘性能。(见直流电压试验)

**绝缘类型与试验要求** 电力设备的绝缘结构,按其性能是否受外界空气等条件的影响,可分为外绝缘和内绝缘;按其在发生破坏性放电后绝缘性能能否恢复的特性,可分为自恢复绝缘与非自恢复绝缘。对不同的绝缘类型,绝缘试验的要求也有所不同。

**内绝缘** 电力设备箱壳内部的固体、液体或气体绝缘。其性能基本上不受大气、污秽和潮气等外界条件的影响,但在工频运行电压和暂时过电压的作用下,常会有绝缘老化的现象。在交流电压试验中,除进行额定工频耐受电压试验外,常常还需要用长时间工频电压试验和局部放电试验进行检验。

**外绝缘** 电力设备暴露在大气条件下的空气间隙或固体绝缘的外露表面。它的绝缘性能要受到大气、污秽和潮气等的影响。对设备外绝缘除了要进行短时工频耐受电压试验和操作冲击电压试验的干试验外,还要进行湿试验。对于有耐污秽要求的瓷和玻璃绝缘子、

套管等,还要进行长时间工频电压下的人工污秽试验。

**自恢复绝缘** 在发生破坏性放电后,能完全恢复其绝缘性能的绝缘。这类绝缘一般是外绝缘。对自恢复绝缘,可以进行破坏性放电试验。

**非自恢复绝缘** 在发生破坏性放电后,丧失或不能完全恢复其绝缘性能的绝缘。这类绝缘一般是内绝缘。对非自恢复绝缘,通常多采用耐受电压试验以及其他非破坏性试验来检验其绝缘性能,如局部放电试验、介质损耗因数测量和泄漏电流试验等。

**设备制造和使用过程的试验分类** 按电力设备在制造和使用的不同阶段,绝缘试验通常可分为型式试验、出厂试验、交接试验和预防性试验。

**型式试验** 新产品的定型试验,用以保证产品的设计性能。但在下列情况下,虽非新研制的产品,通常也要求进行型式试验:①产品转厂生产时;②产品的结构、材料、工艺有较大改变,可能影响产品性能时;③正常生产一定时间或积累一定产量后;④长期停产后恢复生产时;⑤出厂试验与型式试验的结果出现较大差异时。型式试验是对产品质量进行全面考核的试验,试验项目包括检验产品的全部技术要求。

**出厂试验** 验证出厂产品的质量是否达到规定的技术要求的试验,分为例行试验与抽样试验。对每件产品都要进行的试验项目,称为例行试验;对某些试验项目规定只按抽样规则抽取少数产品进行试验,称为抽样试验。

**交接试验** 输配电设施建设竣工,施工部门向运行部门移交时,为检验安装质量所进行的试验。

**预防性试验** 输配电设备在运行期间,为检验其是否处于正常工作状态所进行的定期试验和检修前后的试验。

**外绝缘试验与大气条件** 外绝缘的破坏性放电电压与试验时的大气条件有关。通常,放电电压随着空气密度或湿度的增加而升高。当空气的相对湿度约大于 80% 时,放电电压会变得不规则。为此,国际电工委员会(IEC)第 42 技术委员会(高电压试验技术委员会)规定了外绝缘试验的标准大气条件以及大气条件修正因数,即空气密度和湿度的修正因数。当试验时的大气条件与标准条件不同时,利用修正因数可将测得的放电电压换算为标准条件下的电压值,反之也可将标准大气条件下规定的试验电压值换算到试验条件下的数值。

**标准大气条件** 温度  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ , 气压  $b_0 = 101.3 \text{ kPa}$ , 绝对湿度  $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$ 。

**空气密度和湿度的修正因数** 如果试验时的大气压力  $b$  与标准大气条件的气压  $b_0$  用同一单位表示,温度  $t$  用摄氏度表示,空气密度修正因数为

$$K_d = \delta^m = \left( \frac{b}{b_0} \times \frac{273 + t_0}{273 + t} \right)^m$$

式中  $\delta$  被定义为相对空气密度。空气湿度修正因数为

$$K_h = K''$$

式中  $K$  取决于试验电压类型, 并且是绝对湿度  $h$  与相对空气密度  $\delta$  的比  $h/\delta$  的函数;  $m, w$  可从有关标准中所提供的图中查出。

破坏性放电电压正比于  $K_d K_h$ , 根据这一关系, 标准大气条件下的电压  $u_0$  和试验状态下的电压  $u$  可按下式换算

$$u = K_d K_h u_0$$

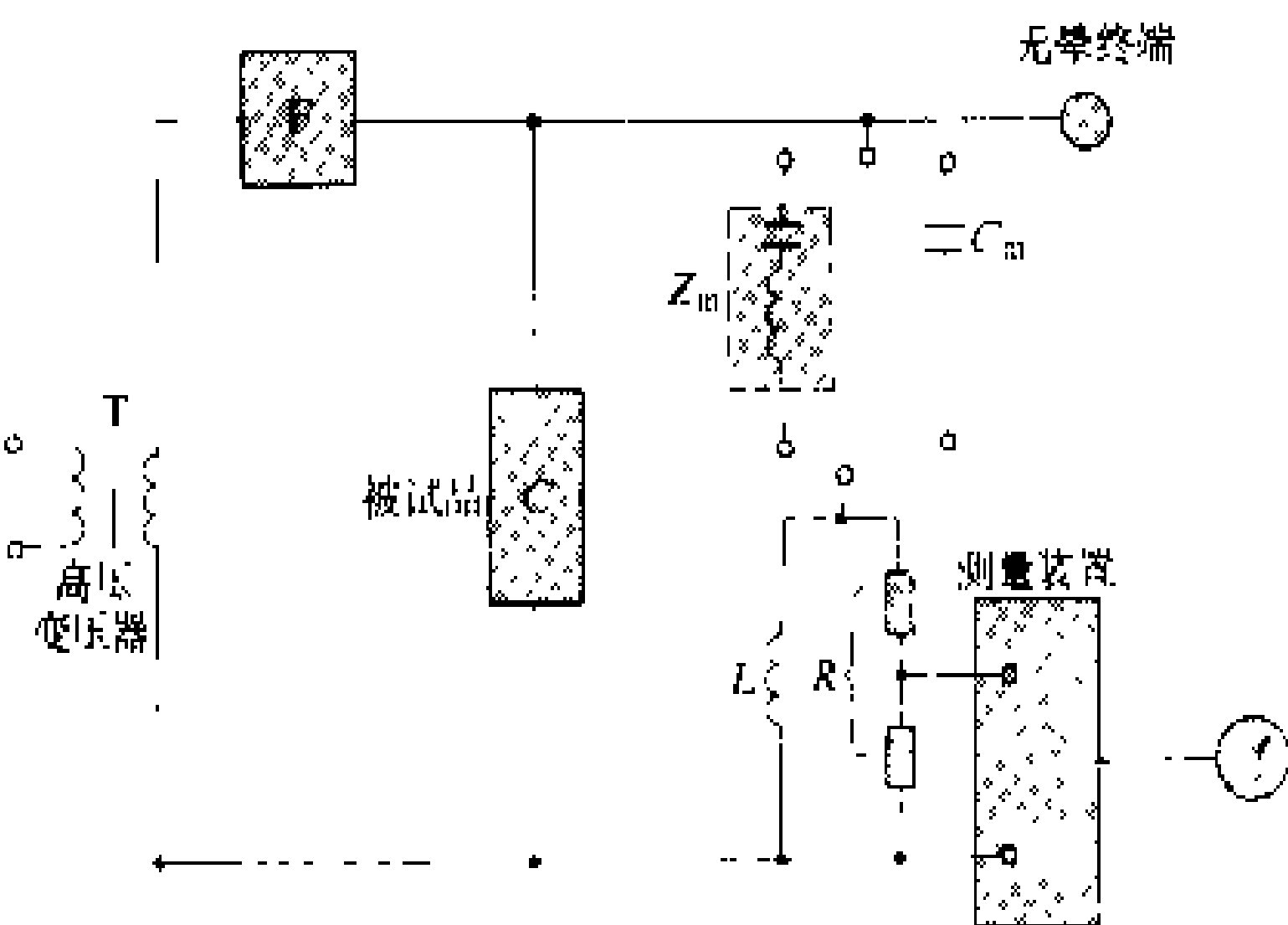
**海拔高度对外绝缘试验的影响** 外绝缘的放电电压随海拔高度的升高而降低。标准中规定的试验电压值都是只适用于在海拔 1000 m 及以下运行的设备。当在海拔低于 1000 m 处的高电压实验室试验将用于海拔高于 1000 m 处的电力设备时, 外绝缘的试验电压应按标准规定的额定耐受电压值乘以海拔修正系数  $K_a$ 。

中国现行国家标准规定  $K_a = \frac{1}{1.1 - H \times 10^{-4}}$ , 式中  $H$  为被试设备安装地点的海拔高度, m。

(杨吟梅)

gaoya dianqi wuxiandian ganrao shiyan

**高压电器无线电干扰试验** (radio interference test of high voltage equipment) 测量输电线路设备(绝缘子串、金具等)和变电所设备(隔离开关、断路器等)在工作电压作用下由于电晕放电所引起的无线电干扰的试验。目的是把高压设备因电晕放电产生的无线电干扰控制在限值以内, 使其向线路注入的干扰电流仅占线路总干扰电流的极小部分, 因而使线路的无线电干扰水平只决定于导线, 设备的干扰影响可忽略不计。(见电晕试验)



高压电器无线电干扰标准测试回路

**试验回路** 国际无线电干扰委员会(CISPR)规定的试验回路见图, 图中各元件的作用是: 阻塞滤波器F

用来阻止电源与被试设备间的干扰电流流动; 阻抗  $Z_m$  由无电晕的高压耦合电容器和电感组成, 通过改变线圈电感, 调谐在测试频率下阻抗为零, 如果耦合电容器电容量  $C_m$  大于被试品电容  $C$  的 5 倍以上,  $Z_m$  可用  $C_m$  代替, 此时无需电感线圈;  $R$  代表被试品在运行中的电阻负载, 在试验电压作用下, 被试品产生的高频干扰电流在该电阻上的压降, 代表运行时被试品产生的无线电干扰电压, 以  $\mu V$  或 dB 为单位。按 CISPR 规定,  $R$  阻值为 300  $\Omega$ , 测量频率为 500 kHz。实际调试时要求带电导线与地之间的阻抗 ( $Z_m + R$ ) 在测量频率下应是  $300 \pm 40 \Omega$ , 相角不超过  $20^\circ$ 。图中电感  $L$  是保护无线电干扰仪用的, 对工频电流是一低阻抗通道。美国的规定与 CISPR 的规定略有不同;  $R$  取值为 150  $\Omega$ , 测量频率为 1 MHz, 也得到了国际上的承认。

**试验方法** CISPR 规定, 先在高于规定试验电压 10% 的电压下加压 5 min, 然后将电压逐级降至规定试验电压的 30%, 再逐级升高至最初值, 并持续 1 min, 最后再逐级降至规定试验电压的 30%, 级差约为试验电压的 10%。在每级电压下都进行无线电干扰电压的测量, 并将最后一次降压过程中测量的干扰值和对应的电压绘成关系曲线, 该曲线称为被试品无线电干扰特性曲线。

为了防止外界干扰的影响, 试验要在有良好屏蔽的实验室内进行, 如果没有这一条件, 也可以在背景干扰很小的户外场地进行。被试品的布置应尽可能接近实际运行情况。

(杨吟梅)

gaoya jiakong peidian xianlu

**高压架空配电线路** (high-voltage overhead distribution line) 具有较高电压等级 (35~110 kV) 的架空配电线路, 作为地区枢纽变电所向某一地区的一个或几个地区变电所或大用户的变电所供电的重要配电线路。在农村配电网中, 往往成为农村一个地区的唯一电源线, 因而也被看作起到输电的作用, 尤其是 110~150 kV 电压级线路常被称为次输电线路。各国的高压架空配电线路的电压等级有 33 kV、34.5 kV、35 kV、63 kV、69 kV、110 kV、132 kV、138 kV、154 kV 等。中国高压架空配电线路现行的标准额定电压为 35 kV、63 kV 和 110 kV 三种。

**线路组成** 组成架空配电线路的基本部件是导线、绝缘子和杆塔。各国根据各自的气候条件、使用经验和产品条件, 在高压架空配电线路上使用钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线、铝合金绞线、铝包钢芯铝绞线、钢芯耐热铝合金绞线和铜绞线等导线品种 (见架空线), 图 1 所示为导线断面图。中国使用较多的是钢芯



铝绞线和钢芯铝合金绞线。高压架空配电线路中,各国除一般使用悬式绝缘子和针式绝缘子外,现已开始使用合成材料制成的棒式绝缘子。中国则主要使用悬式绝缘子、瓷横担和瓷质棒式绝缘子。高压架空配电线路的杆塔,各国普遍采用木杆、钢杆、铁塔和钢筋混凝土杆等。中国普遍采用钢筋混凝土电杆,也常使用铁塔。杆塔间的档距一般由几十米至几百米不等。杆塔上的排列,根据需求和客观条件有所不同,排列型式很多,见图2。

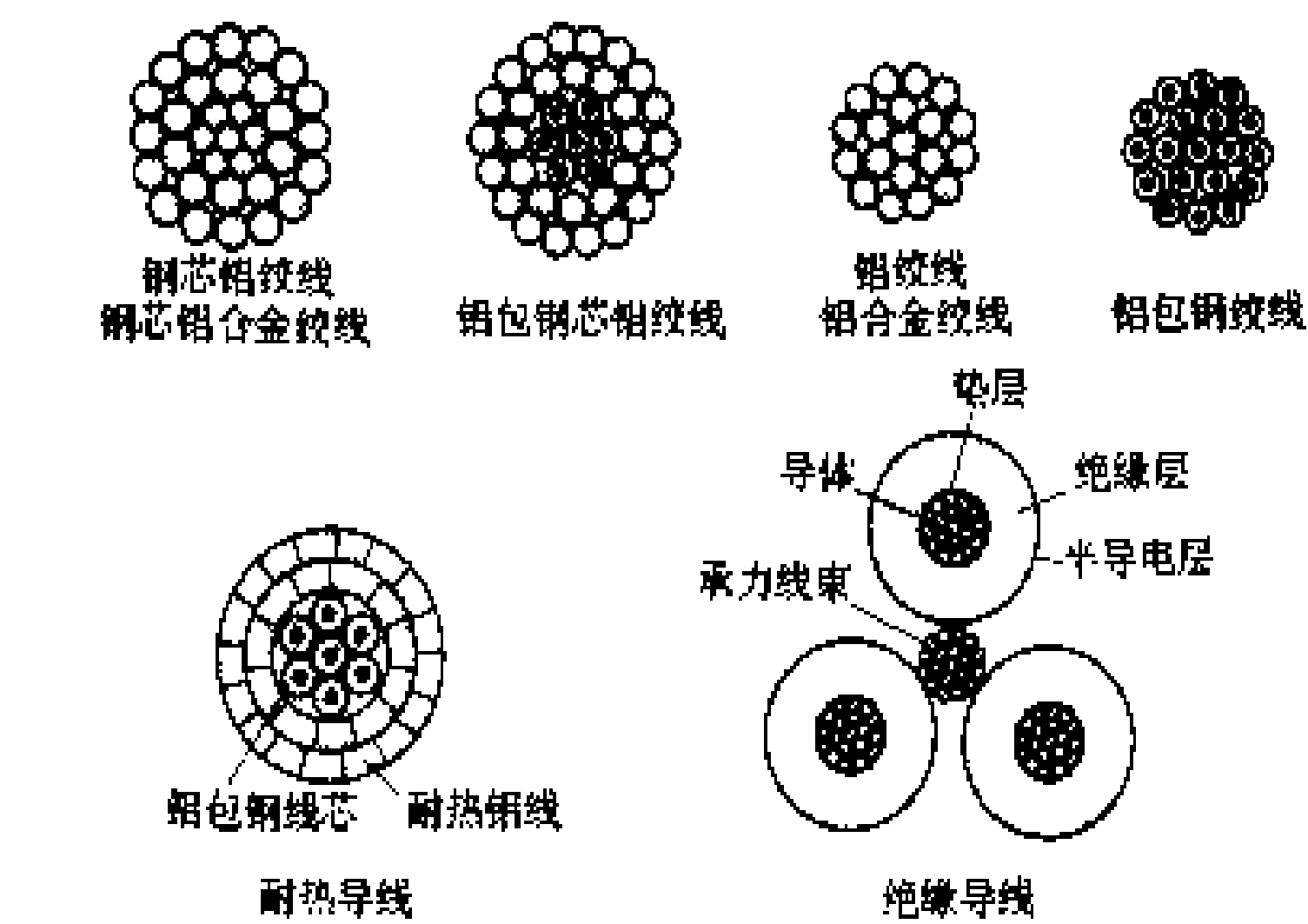


图1 导线断面图

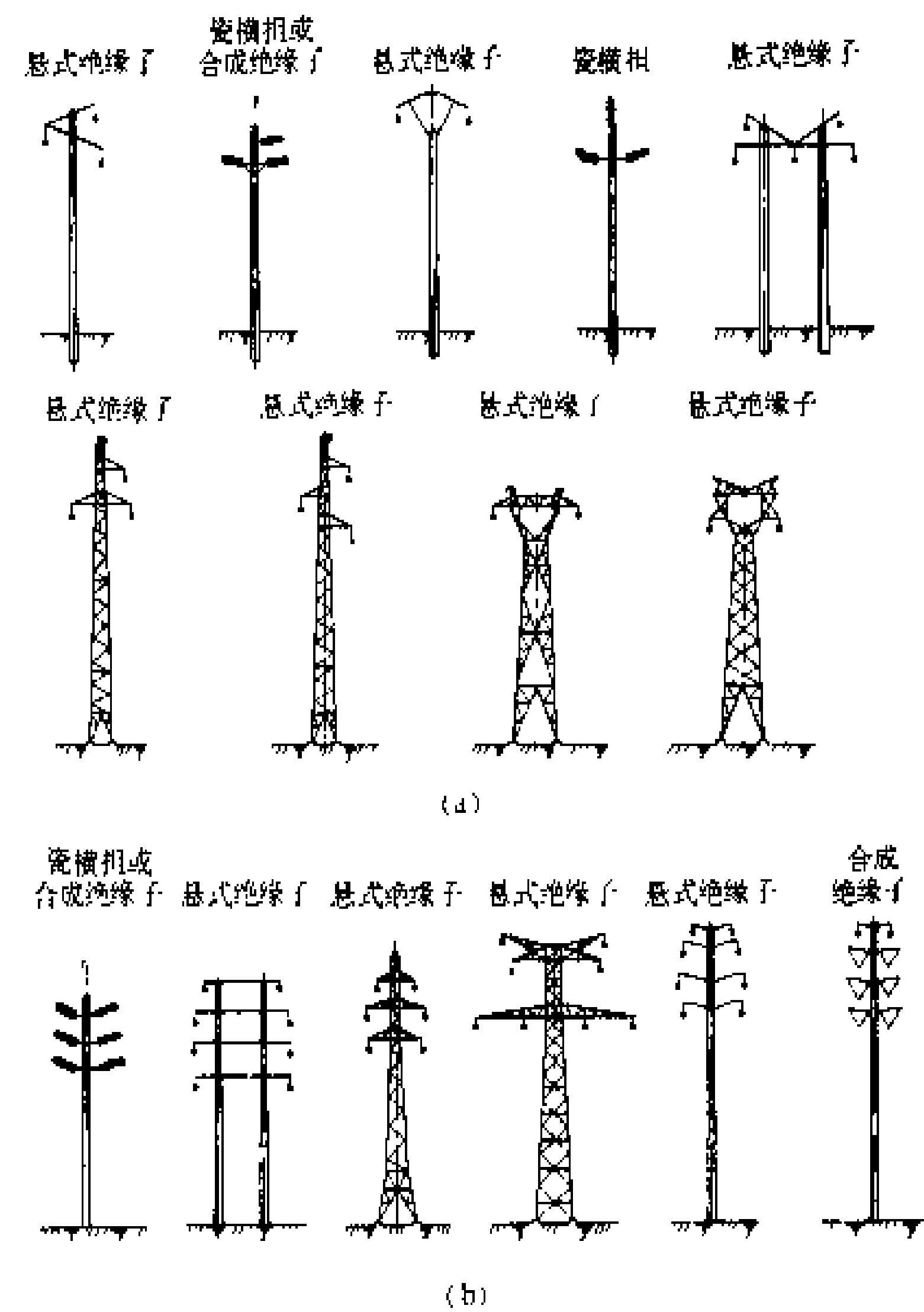


图2 高压架空配电线路杆塔排列图

(a) 单回路高压架空配电线路杆塔排列型式; (b) 双回路高压架空配电线路杆塔排列型式

主要特点 与其它架空线路相比较,高压架空配电线路的主要特点是:①支撑点较少;②在档距大、导线张力高的线路上安装有导线防震装置;③由于电压

等级不很高,一般不采用分裂导线;④在大气过电压保护方面,110 kV 电压等级的架空配电线路通常与超高压输电线路一样采用全线避雷线保护,其它较低电压等级的线路则根据各国的不同标准,有的采用全线避雷线保护,有的则在变电所进线段1~2 km 内架设避雷线保护,中国则采用进线段架设避雷线保护;⑤在城市配电网中,较低电压等级的高压架空配电线路往往与中、低压架空配电线路同杆架设,而在110 kV 电压等级的线路下,一般不再安排其它电压等级的线路同杆架设。

发展趋势 随着高压电力电缆生产技术的成熟和普及,高压架空配电线路在城市配电网中已逐步采用地下敷设的电力电缆,以配合城市规划和美化环境。对33 kV 电压等级架空线路,也已开展架空导线绝缘化,在通过林带或树木茂密地区,德国、芬兰、瑞典等国家已开始使用带绝缘层的绝缘导线,以防止树枝碰线造成接地短路故障。在高压架空配电线路设计方面,为保证在气候恶劣条件下的运行可靠性,采用按严峻气候条件设计线路,并对线路各部件之间的强度注意相互匹配。

参见彩图插页第26页79图。

参考书目

机械工程手册 电机工程手册编辑委员会, 电气工程师手册, 北京: 机械工业出版社, 1986

(周德新)

gaoya kaiguan shebei liansuo zhuangzhi

高压开关设备联锁装置 (high voltage switchgear interlocking device)

为了防止高压开关设备的误操作而在隔离开关及其相应的断路器或者在同一组或不同组隔离开关的主刀闸与接地刀闸之间设置的安全联锁装置。高压开关设备的联锁装置有电磁锁(见图1)和机械联锁机构(见图2)两种。按实现联锁的方式不同,分为电气联锁、电磁联锁和机械联锁三种。利用微机技术的逻辑性强、结构严密、能简化外部接线等特征来实现联锁,是近年来开发的一种趋向。

电气联锁 按照不同的电气主接线所要求的联锁条件,实现对隔离开关操动机构的电操作回路的闭锁。当操动机构由电动机或压缩空气驱动时,按联锁条件要求在操作回路中串入各相应隔离开关及断路器的辅助接点,只有在所串入的辅助接点皆处于闭合状态时,才能接通操作回路,起动电动机的电源开关或空气阀门的电磁线圈去操动隔离开关动作。

当隔离开关或断路器的辅助接点数量不够时,可先将辅助接点通过中间继电器的转换以增加接点,再

将继电器的接点串入联锁回路。

**电磁联锁** 按照不同的电气主接线所要求的联锁条件,实现对隔离开关操作手柄的电磁锁的电气回路的闭锁,从而达到对操作手柄的机械闭锁。当隔离开关由手力操动时,采用电磁锁(见图1),并按联锁要求

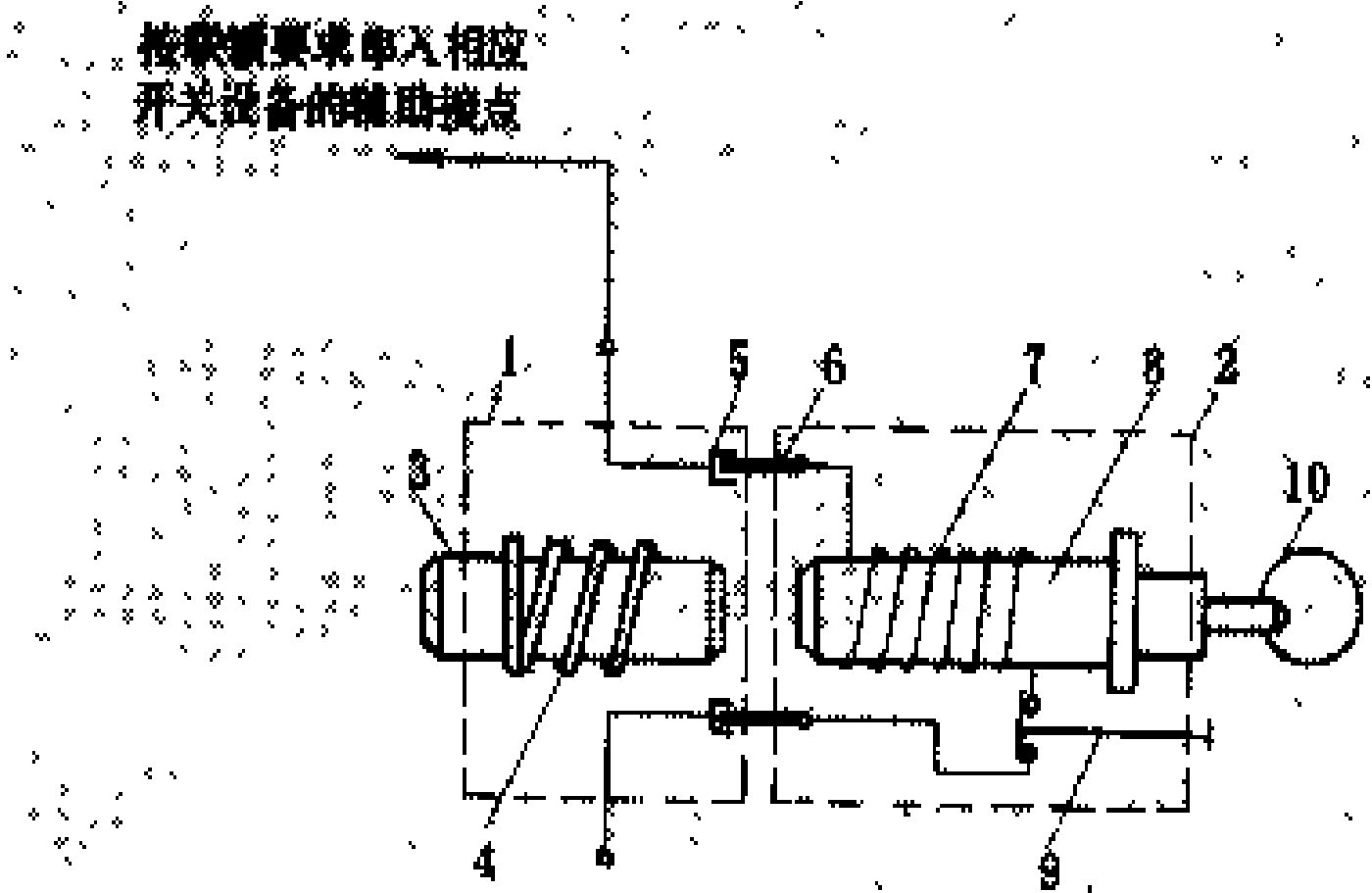


图1 电磁锁

1—电磁锁;2—电钥匙;3—可动铁销;4—弹簧;5—铜管插座;6—插头;7—线圈;8—电磁铁;9—解除按钮;10—金属环

在电磁锁回路中串入各相应隔离开关及断路器的辅助接点,只有在所串入的辅助接点皆闭合时,电磁锁的钥匙线圈才接通电源,而吸出可动铁销,实现手动操作隔离开关。

**机械联锁** 利用挡板等机械结构来直接实现对隔离开关操作手柄的闭锁。机械联锁大多用于简单的开关设备,如装在成套开关柜上的具有手力操动机构的6~10kV隔离开关和断路器。此外,在同一组隔离开关的主刀闸与接地刀闸之间,也多采用机械联锁。

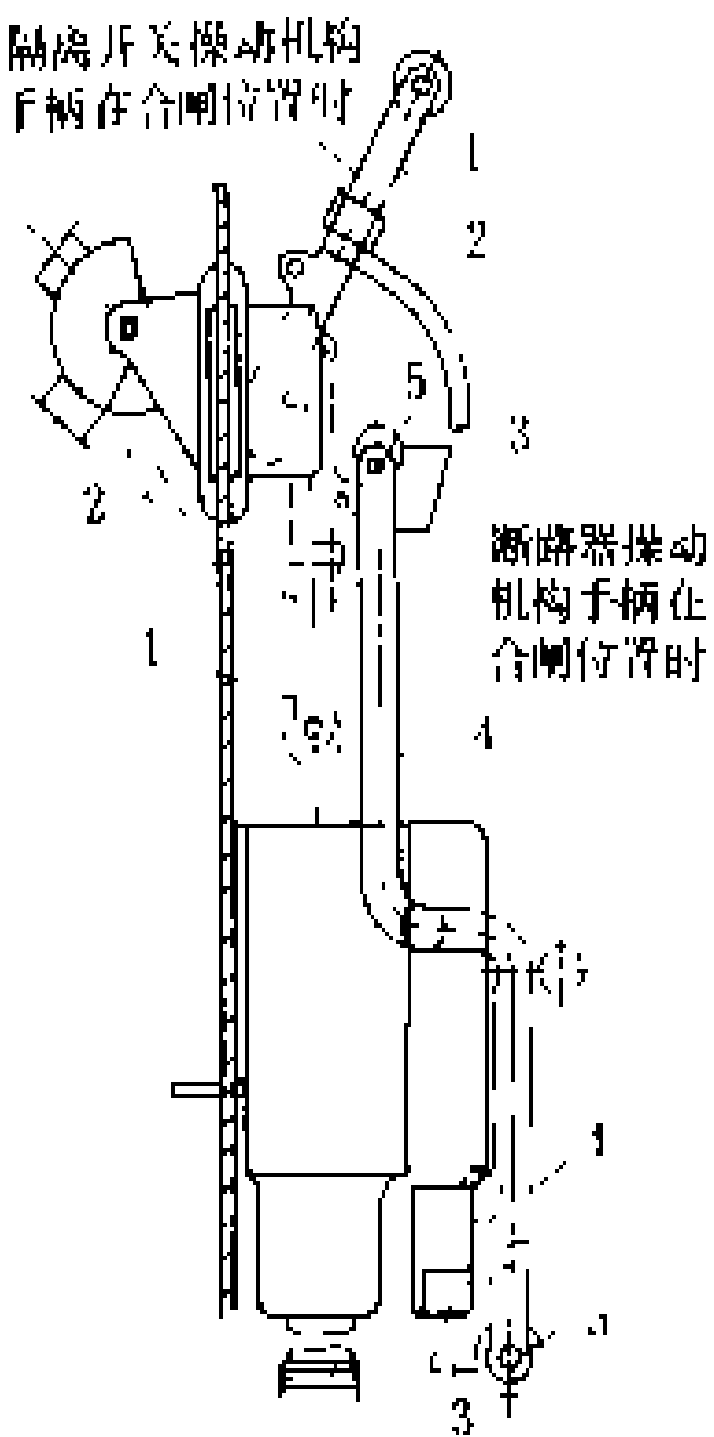


图2 挡板式机械联锁装置

1—隔离开关操动机构手柄;2—撑条;3—挡板;4—断路器操动机构手柄;5—轴

(郑剑秋)

gaoya peidianwang

**高压配电网** (high voltage distribution network) 由高压配电线路和配电变电所组成的向用户提供电能的配电网。高压配电网的功能是从上一

级电源接受电能后,可以直接向高压用户供电,也可以通过变压为下一级中压配电网提供电源。高压配电网容量大,负荷重,负荷节点少,其重要性较高。高压配电网的电压等级是随着地区电网的发展而逐步提高的,如中国在地区电网发展初期,用电量不大时,35kV、63kV、110kV都曾作为输电电压对待,只是后来地区电网迅速发展,用电量增加,城市外围出现了220~500kV电压后,35~110kV才具有配电电压性质。由于处在不同发展阶段,110kV(包括132kV等)电压等级,至今在某些国家和地区仍作为输电电压,也有的国家称之为次输电电压。(见配电网)

**电压等级** 高压配电网以选用单一电压等级为宜。但由于历史发展等原因,世界各国在负荷长期增长的过程中,常发展成两种或三种、甚至三种以上的不同电压等级。例如:英国采用132、66、33kV,美国采用138、115、69、34.5kV,法国采用150、90、63kV,日本采用154、77、66、33kV,苏联采用110、35kV。在中国,高压配电网包括110、63、35kV三个标准电压等级,一般城市配电网采用110kV作为高压配电电压,在中国东北地区则采用63kV作为高压配电电压,少数地区则是110kV和35kV两种电压等级并存。

**网络接线要求** 高压配电网供电可靠性要求高,一般在一条高压配电线路或一台配电变压器停电时,电网仍能满足用户全部用电的需要。为此,高压配电变电所的进线通常至少有两回,每回线来自不同电源点或同一电源点的不同母线段,也可以将几个配电变电所的电源进线串接成环形接线。高压配电变电所一般配置两台或两台以上同容量的主变压器,其容量与电源进线容量相配合。主变压器正常运行的利用率是在一台主变压器停运后,其余主变压器的短期过负荷能力和变压器二次侧母线上备用联络线所能提供的容量来决定的。配电变电所增加进线回路和相应的变压器台数,以及增加备用联络线容量,都可以提高主变压器利用率。只有一台主变压器的配电变电所,更要设法提高其二次侧母线上的联络容量。(见配电网接线)

(唐德光)

gaoya rongduanqi

**高压熔断器** (high voltage fuse) 利用串联于电路中的一个或多个熔体,在过负荷电流或短路电流的作用下,于一定的持续时间内熔断以切断电路的电器称为熔断器。电压在1kV以上的熔断器称为高压熔断器。

高压熔断器主要由熔体和本体二部分构成。熔体是由铅、锡、铜、银等金属组成的合金,能承受正常工作电流。熔体通常做成丝状、片状或柱状,在过负荷和



短路电流作用下,熔体被熔断,在熔体的两端头之间形成电弧,随着被熔断的熔体两端头之间距离的增加,最后电弧熄灭,电路即被切断,在更换新的熔体后熔断器便能恢复使用。熔断器的本体包括安装在熔体外面的纤维管、瓷套管和管座。

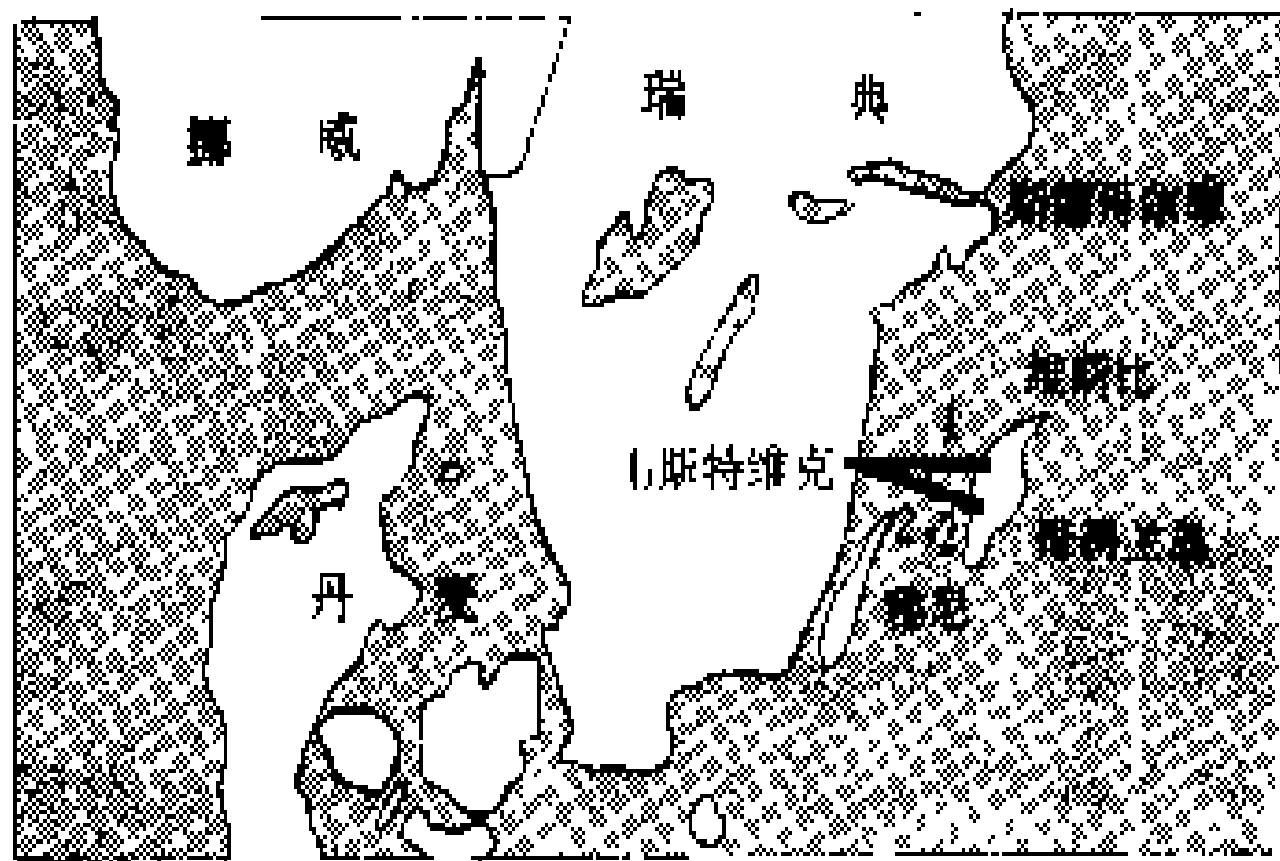
高压熔断器又分为限流型和非限流型二种。限流型高压熔断器的瓷套管内部往往充满石英砂,起限流和灭弧作用。非限流型使用最广泛的是跌落式熔断器,其熔体放置于产气熔管中,依靠作用在熔体上的拉力使熔管保持在合闸位置,当熔体熔断后,熔管下落,将电路切断,并形成可见的断开点。

高压熔断器是一种使用最早的保护电器,结构简单轻巧,维护方便,价格便宜,在中国 10 kV 及以下的配电线路和配电变电所中得到广泛应用。也有的将高压熔断器与负荷开关配合使用,以代替昂贵的断路器。此外还发展了 35kV 户外自动重合闸的跌落式高压熔断器,用于 35kV 配电系统的出线回路中。有些国家已将高压熔断器用于更高的电压等级中,例如美国用于 170kV 系统,苏联用于 220 kV 系统。

(蓝增环)

Gedelan zhiliu shudian gongcheng

**哥得兰直流输电工程** (Gotland HVDC transmission scheme) 世界上第一个工业性高压直流输电工程。由瑞典本土通过 95 km 海底电缆向波罗的海中的哥得兰岛送电。输电线路中有相当长的距离需用海底电缆,而电缆工程又以直流输电较为经济,因此确定采用直流输电。整个工程由三个极组成,整流站均设在瑞典东海岸城市韦斯特维克(Västervik)的郊区。逆变站分别设在哥得兰岛的维斯比(Visby,第一极)和雅尼(Ygne,第二、三极)。其地理路径如图所示。



哥得兰直流输电工程路径图

第一极工程最早建成,于 1954 年投入运行,换流站是由两个六脉动汞弧阀换流桥串联组成的一个十二脉动换流器。直流电压—100 kV,直流电流 200 A,输送功率 20 MW,单极—海水回路方式。1970 年,一方

面为了增大输送功率,另一方面为了试验晶闸管换流阀,整流站和逆变站又各装一组由晶闸管阀组成的六脉动换流桥,将直流电压提高到—150 kV,直流输送功率增大到 30 MW。

第二极工程于 1983 年 11 月建成投产,直流电压—150 kV,最大输送功率 165 MW,能满足哥得兰岛的总负荷需求。因此,第二极正常运行后,第一极工程即停止运行。

第三极工程是为了提高供电可靠性而建设的,与第二极组成±150 kV 双极系统,总的输送功率达 2×165 MW。当任一极故障或检修时,仍能满足全岛最大负荷的需要。

哥得兰直流输电工程是瑞典国家电力管理局所有的产业,主要设备均为瑞典 ASEA 公司制造。该工程实际上是瑞典国家电力管理局的中间试验基地,新设备和新的运行方式均在此进行试验和运行考验,直流 GIS 也曾在此基地试用。

(赵晓君 邢俊杰 郑德明)

geshi wangluo

**格式网络** (grid network) 一种配电网接线方式,亦称格网式配电网。将沿街道敷设的电缆线路,每相导线在每个街道交叉处相互实连,形成一种格子式的网络,向照明及其他电力用户供电。格式网络的最高运行电压一般不超过 410/240V,三相四线,适用于负荷面广的城市中心商业区。格式网络具有不间断供电,电压质量好,电能损耗小,容量扩展方便和为新用户接电容易等优点。

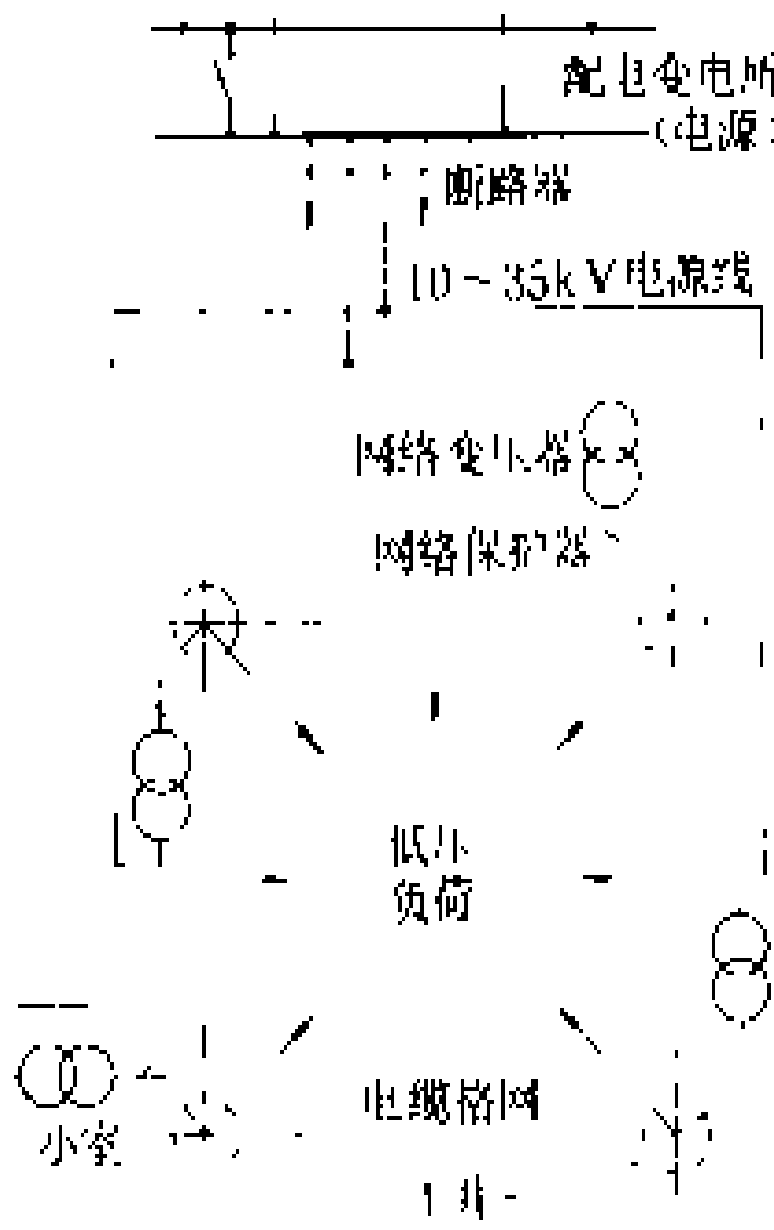


图 1 低压格式网络和电源线的单线图

1922 年第一个带自动网络保护器、由多路电源供电的低压格式网络在美国投入运行,之后逐步完善推广,成为世界上经济发达国家大城市普遍采用的低压配电网接线方式。

网络结构 不同城市的格式网络尽管在结构上有些差异,但基本原理和功能相同,如图 1 所示。

(1) 网络本身为一低压电力网,由四根单芯电缆(三相四线)沿街敷设并在街道交叉处实连,用户由此电缆支接。

(2) 网络通过多个网络单元与电源线连接。网络单元由一台网络变压器和一个网络保护器组成。

(3)至少用二条,一般用四条或更多电源线为这些网络单元供电。这些电源线的电压为10~35kV。每一电源线供若干个网络单元。相邻的网络单元由不同的电源线供电。

图2是英国伦敦格式网络的典型布置图。为了减少各网络变压器二次侧电压和相角的差别,以利于并联运行,四条电源线由同一配电变电所的同一条母线送出。图中八块实连的格式网络,每块由接于同一电源线的变压器供电,相邻的格式网络由不同的电源线供电,格式网络间用边缘熔断器并联,极大地提高了供电可靠性。所有部件(如电缆线路、用户的支接线等)都设于地下。安装网络单元的小室,建于街道或人行道的地下或大楼的建筑物中。在街道交叉处设有工井,以便电缆线路的敷设和连接。电缆至用户的支接点设有人井,施工人员可进入工作。

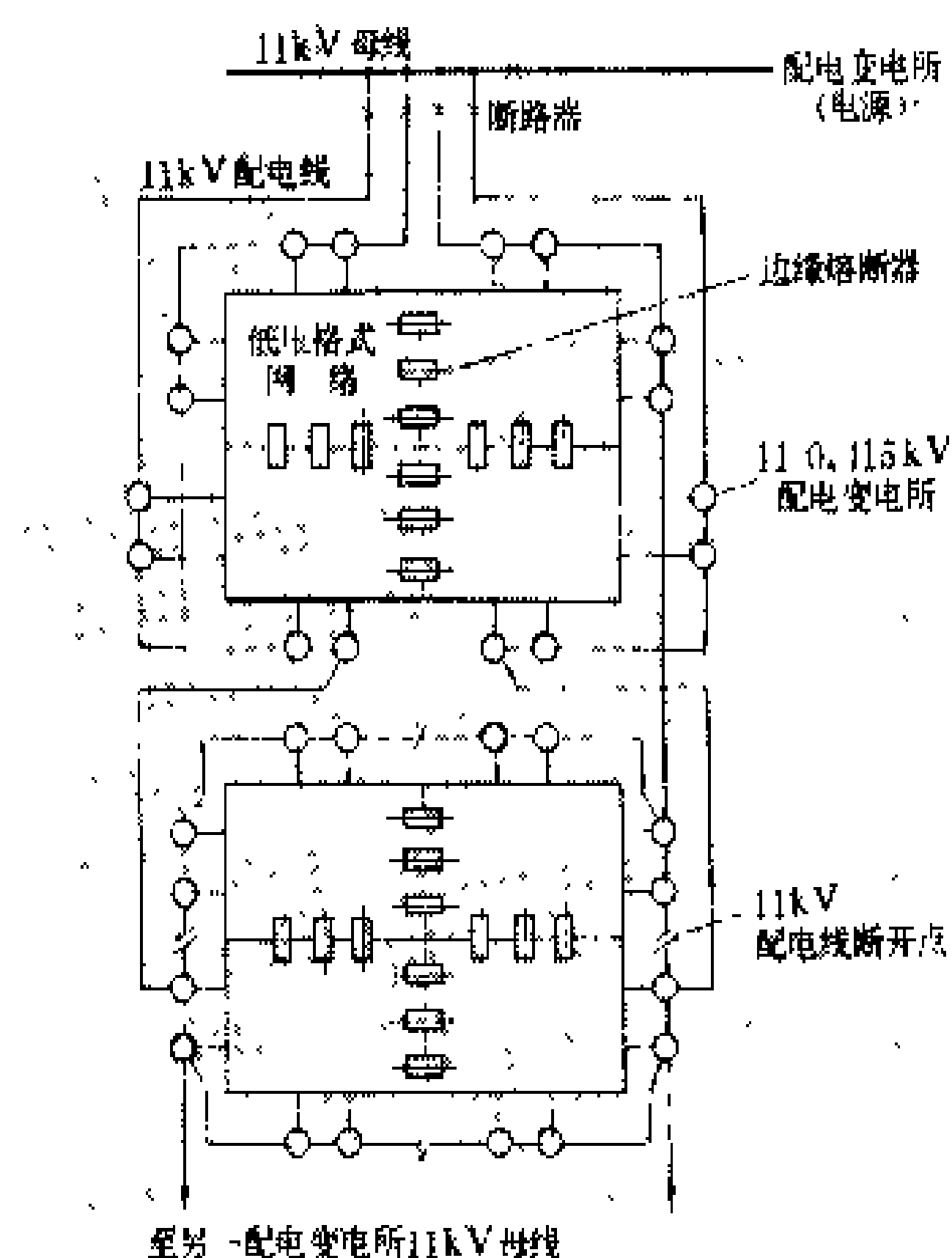


图 2 伦敦格式网络典型布置图

网络运行 格式网络的主要特点是不间断供电。实连在一起的电缆是根据“故障自行烧清”的原则设计的，即电缆故障时自两侧来的故障电流将故障点导线熔化烧断，使电缆脱离故障，电弧自行熄灭，电缆继续运行而不引起用户停电。要可靠实现故障自行烧清，则要求故障电流值要适当。根据实验和计算，烧清最严重故障的最小故障电流与电缆的截面有关，对于 40~250 mm<sup>2</sup> 的电缆分别为 1500~5000 A。需要用大于 250 mm<sup>2</sup> 的电缆时，最好用二根小截面的电缆并联。格式网络的额定电压不能太高，例如采用 460/260 V 时，灭弧就不大可靠。采用单芯电缆也是为了便于烧清故障和灭弧的需要。

格式网络中的配电变压器为三相降压变压器,容量标准化,一般为  $300 \sim 1000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 。英国伦敦格式

网络中采用的是 500 kV · A 和 750 kV · A 二种规格的配电变压器, 当地区负荷线密度超过 0.6 MW/km 时用 750 kV · A 的规格。配电变压器容量若太小, 则故障电流烧不清故障; 若容量太大, 则电弧不易自动熄灭。使用同一规格的配电变压器组成格式网络, 还可使潮流分布优化, 电压质量最好, 线路电能损耗最小。

网络保护器由自动开关、后备熔断器、主继电器、核相继电器和退敏继电器等组成，配合配电变电所一次出线断路器隔离故障。当电源线电缆发生相间短路或单相接地故障时，配电变电所出线断路器跳闸，此时网络保护器中的自动开关由反应于逆功率和反向励磁电流的主继电器动作跳闸，隔离故障。剩下的电网由邻近的电网通过边缘熔断器供电。当电源线故障修复恢复供电时，自动开关一侧的变压器电压略高于和相角略超前于另一侧电网电压时，核相继电器动作，合上自动开关，电流即由变压器送出。有时低压电网中有反馈性负荷如电梯群等，反向功率会使有关自动开关反复跳跃动作，所以还配置了退敏继电器。

格式网络之间的边缘熔断器是在自动开关拒动时作为后备保护的。此外,若故障不能自行烧清,则直接供电的自动开关全部跳闸,但故障电流仍可由邻近电网送来,此时因线路阻抗较大,不会使有关断路器跳闸,时间一长会导致电缆绝缘损坏或工井失火。边缘熔断器就是为了切断这种故障电流而设计的,其安时特性为:在故障清除情况下能送出负荷电流,在故障继续存在情况下能与电缆绝缘损坏特性相配合。格式网络的电源线一般按单环网开环运行设计,同一配电变电所的出线互为备用,满足 N-1 安全准则的要求。

**故障找寻** 格式网络中的电缆故障，一般可根据运行经验由故障点地面的变化找寻，遇用户停电时，可根据熔断器的熔断情况来判断故障范围。一般有下列四种情况：

(1)故障自行烧清,用户不停电。这种故障一般发生于主干线,故障电流大到可以掀起故障点上面人行道上的盖板或工井的盖板。根据交通警察报告,即可找到故障点。

(2) 故障自行烧清, 少数用户停电。可能为支线电缆故障, 可根据停电用户的地址、熔断器熔断和地面异常情况综合判断故障点的位置。

(3) 故障未能自行烧清, 网络自动开关全部跳闸, 边缘熔断器全部熔断, 网上用户全部停电。这说明故障非常严重, 燃烧时间长。这种故障点一定能在人行道盖板掀起或工井盖板掀起的附近找到。

(4)很多用户停电,故障点地面又无明显异常状态  
此时只能用逐段试送的办法来寻找故障点。

发展趋势 格式网络虽有很多优点，但结构和运行复杂，且投资昂贵。据英国伦敦供电局资料，伦敦建立格式网络时在总长为 6437.36 km (4000 英里) 的主干街道两边一次敷设了 14484.06 km (9000 英里) 截面相当于 129 mm<sup>2</sup> (0.2 平方英寸) 铜芯的四芯电缆线路，按 1967 年价格计算，其投资即达 8000 万英镑。到目前为止，格式网络的运行经验是满意的。

随着城市的发展，负荷密度愈来愈大，已建立的格式网络需要增加网络变压器，从而使网络的短路容量不断上升。据有关资料反映，曾在网络故障时还引起过设备爆炸和人身事故。而制造高一级开断能力的开关设备，成本也要大量增加。此外，近年来城市建设已向负荷集中、容量大的高层建筑或地下设施发展，这种负荷一般用专线高压供电，不宜接在格式网络上。而对分散的中、小型负荷，即使采用辐射结构供电，因可靠性差而引起的少送电损失亦属有限。因此认为，随着城市负荷性质的变化和不断增长，是否继续采用格式网络，需要在投资和经济效益上恰当权衡。目前，某些国家已考虑不再扩大现有格式网络的规模。

总之，格式网络必须按照城市发展规划前景，预先增加投资，而且投资甚为昂贵，其经济效益上存在致命弱点。此外，从国外的某些格式网络的多年运行中，又发现其保护配置十分复杂，不利于运行维护。所以，已建立的格式网络不再扩大，未建立的也视为不宜再推行。

见配电网结构。

参考书目

GEC. Electric Utility Systems and Practices. New York: John Wiley & Sons, 1983

Remde M E. Fundamental Planning of the Electrical Power Network Under Technical and Economical Consideration. BBC, 1980

(屠三益)

geli kaiguan

**隔离开关** (disconnecting switch) 一种在分闸位置时其触头之间有符合规定的绝缘距离和可见断口，在合闸位置时能承载正常工作电流及短路电流的开关设备。当工作电流较小或隔离开关每极的两接线端间的电压在关合和开断前后无显著变化时，隔离开关具有关合和开断回路的能力，兼有操作和隔离功能。

结构型式 隔离开关主要由绝缘瓷柱（支柱绝缘子）和导电活动臂组成。按照支柱绝缘子的数量划分，一般有单柱式隔离开关、双柱式隔离开关、三柱式隔离开关和 V 型隔离开关。按照支柱绝缘子的数量和导电

活动臂的开启方式划分，一般有单柱垂直伸缩式、双柱水平旋转式、双柱水平伸缩式、三柱水平旋转式四种型式。①单柱垂直伸缩式。上半部为折叠式导电杆，下半部为一个垂直绝缘支柱，导电杆能上下活动，开断时可形成一个垂直方向的空气间隙。它可以直接布置在母线下方，按照不同的母线设计方案，三相隔离开关可以垂直于母线中心线布置，也可以错开布置。②双柱水平旋转式。二个绝缘支柱分开并垂直布置，开断时其顶部活动杆在水平面内分别旋转 90°，形成一个水平方向的空气间隙，也有二个支柱成 V 型布置，即 V 型隔离开关。③双柱水平伸缩式。在一个绝缘支柱上安装静触头，另一个绝缘支柱上安装折叠式导电杆，导电杆能水平伸缩，开断时可形成一个水平方向的空气间隙。④三柱水平旋转式。三个绝缘支柱分开并垂直布置，两边侧绝缘支柱固定不动，中间绝缘支柱上部安装一个水平式活动导电杆，开断时它在水平面内旋转约 60°，形成二个水平方向的空气间隙。

隔离开关在关合位置时，能承载工作电流，但不能切除短路电流和大的工作电流。隔离开关没有灭弧装置，结构比断路器简单得多，只需要考虑工作电流的发热和短路电流的动、热稳定性。

运行特点 隔离开关处于分闸位置时的空气间隙长度，既要考虑在各种过电压下隔离开关不致发生闪络，还需要考虑检修时人体活动安全范围的要求。通常人体活动安全范围取为 0.75 m，故隔离开关打开后空气间隙长度要求不小于最小安全净距加 0.75 m。例如，220 kV 的隔离开关最小安全净距为 1.8 m（相对地），220 kV 隔离开关分闸位置的空气间隙长度通常不小于 2.55 m。

隔离开关在电力系统中的具体作用与电气主接线有关。例如，双母线接线的母线隔离开关在正常运行时起切换母线的作用，用以将某个回路接入运行方式所规定的工作母线；在检修断路器时，打开母线及出线隔离开关，在被检修的断路器两侧形成明显的空气间隙断开点，起隔离的作用。因此双母线接线中的隔离开关，既有隔离作用，又有操作功能。而在单母线接线或一个半断路器接线中的隔离开关，则只在检修断路器时起隔离作用。此外，双母线接线中的母线隔离开关在进行切换母线倒闸操作的过程中，同一回路的两组母线隔离开关与母线联络回路会形成环路，为此，母线隔离开关分闸时要具备切除环路电流的能力。

选型布置 隔离开关的选型布置与配电装置的型式有关，直接影响配电装置的占地和结构布置。例如，母线用单柱式隔离开关，可直接布置在母线下方，以缩小配电装置的纵向尺寸，从而节省占地。反之，用双柱水平旋转式隔离开关，则要求有较大的相间距离，增加



了配电装置的间隔宽度，在连接母线时又需要一定的纵向尺寸，从而增加了配电装置的占地。此外，双母线接线的两组母线隔离开关选用单柱式时，还可将它们串联呈龙骨式布置，取消处于两组母线中间的一排中央门型构架，以简化结构型式。

(蓝增廷)

geli kaiguan caodong jigou

**隔离开关操动机构** (operating mechanism of disconnecting switch) 操作隔离开关主刀闸和接地刀闸的机械装置。一般有手力操动机构、压缩空气操动机构、液压操动机构和电动操动机构四种类型。不论哪种类型的操动机构，都要求有手动操作的功能，以便在变电所失去操作电源时，或在隔离开关调试期间要求慢速动作时，能实现隔离开关的操作功能。

**手力操动机构** 以人力为操作动力，由凸轮、连杆等组成的一种简单的操动机构。按操作杆动作方向不同，又分为垂直操作和水平操作两种方式。垂直操作方式多用于 6~10 kV 户内开关柜内的隔离开关，水平操作方式多用于 35~110 kV 隔离开关的主刀闸和接地刀闸以及 220kV 隔离开关的接地刀闸。

通常三相式隔离开关的主刀闸和接地刀闸分别采用一个手力操动机构，且三相共用。一般将手力操动机构安装在中相隔离开关的下方，利用连杆与其它二相隔离开关相连。隔离开关的主刀闸和接地刀闸均为三相联动。

220 kV 隔离开关的主刀闸一般不采用手动操作，而其接地刀闸仍采用三相联动水平操作的手力操动机构。对于特殊布置方式的 220 kV 隔离开关，例如三相隔离开关中心线与主母线中心线成 45° 的交叉式布置方式，由于相间连杆与手力操动机构的操作杆之间会彼此碰撞，因此其接地刀闸改为单相操作，即三相接地刀闸需要三个手力操动机构。

**压缩空气操动机构** 以压缩空气为操作动力，实现隔离开关操作的一种操动机构。通常需在变电所内设立集中的压缩空气站，通过管道、阀门系统向每组隔离开关的操动机构供气。通常只有选用空气断路器的变电所，才设立集中的空气压缩系统，隔离开关只是在此时才选用压缩空气操动机构。

**液压操动机构** 以液压为操作动力，由液压缸中的活塞运动来实现隔离开关操作的一种操动机构。中国在 20 世纪 70 年代开始使用液压操动机构，主要用于 110~500 kV 隔离开关主刀闸或 330~500 kV 隔离开关接地刀闸的操作。在 500 kV 配电装置中，一般设置相间运输道路，设备相间距离较大，而且各相隔离开

关之间不安装相间连杆，主刀闸和接地刀闸均采用单相操作方式，配置有单独的操动机构。

液压操动机构由于工艺和密封等原因常常发生渗漏油现象，且结构复杂，制造工艺要求较高，因此自 80 年代起已逐渐被淘汰，代之以电动操动机构。

**电动操动机构** 以电动机为操作动力来实现隔离开关操作的一种操动机构。它具有结构简单、操作灵活、没有渗漏油问题等许多优点，是一种应用很广泛的操动机构。

(蓝增廷)

geli kaiguan shiyan

**隔离开关试验** (tests of disconnecting switch) 根据有关技术标准，采用测试手段，对隔离开关的性能及质量状况进行的检验。其主要内容是要检验隔离开关的导电主回路、绝缘结构、机械和操动特性以及对大气环境适应能力等是否符合技术条件的要求。各项试验通常还分为型式试验、出厂（例行）试验、交接验收试验和预防性试验等。国际电工委员会（IEC）的隔离开关标准规定了试验的项目和要求。中国的国家标准 GB1985《交流高压隔离开关和接地开关》与 IEC 标准的内容基本相同。

**导电主回路试验** 包括动、热稳定试验，发热试验（温升试验）以及主回路直流电阻测量。

**绝缘结构试验** ①按试验电压性质不同有：工频耐受电压试验，雷电冲击耐受电压试验，操作冲击耐受电压试验，或由这些试验电压波形组合而成的复合电压试验；②按试验部位不同有：主回路对地绝缘试验、相间绝缘试验、断口间绝缘试验等；③按自然环境条件不同有：干燥状态、淋雨状态、污秽状态、雾和凝露、冰冻、湿热和高海拔等各项试验。此外，还有二次回路工频耐压试验。

**机械和操动特性试验** 包括分、合闸不同期性检验，动触头机械拔出力测定，整体结构的抗扭、抗弯试验，连续机械操作试验（机械寿命试验），联锁和防误操作检验，端子静拉力试验。

**其他试验** 主要有：耐受地震试验，噪声和无线电干扰电平测定，破冰试验，防雨试验，开断与关合小电流（电容性的和电感性的）及母线转换电流的试验，密封性检验，额定接触区和钳夹力的检验。快速接地开关尚应进行关合额定短路关合电流的试验。

(曹荣江)

geli kaiguan xuanze

**隔离开关选择** (selection of disconnecting switch) 主要包括分合小电流能力、型式选



择、操动机构选择、破冰要求、接地刀闸要求。

分合小电流能力 隔离开关要求具有以下分合小电流能力:①分合电压互感器和避雷器;②分合母线和母线设备上的电容电流;③分合变压器中性点的接地线和电力网无故障时的消弧线圈;④断路器处于合闸状态时,分合旁路隔离开关;⑤分合励磁电流不超过2A的空载变压器,以及电容电流不超过5A的空载线路;⑥断开母线的环流电流。

型式选择 户内式隔离开关按额定参数选择。户外式隔离开关的型式直接影响屋外配电装置的架构型式和占地面积,通常根据配电装置布置特点和使用要求等因素进行技术经济比较后确定。单柱式隔离开关主要用作母线隔离开关,分相布置在母线下,两组母线隔离开关利用下层设备连线串接起来,这样既减少了占地面积,也避免出现双层架空导线和双层式架构。水平回转式隔离开关的防污系列产品和高海拔系列产品比较齐全,适用于需加强绝缘的屋外配电装置,由于它的重量较轻,还可用于高型屋外配电装置。V型隔离开关由于允许侧装且价格低廉,重量轻,故适用于高位布置或利用它加导电杆支持母线的35~110 kV屋外配电装置中。

操动机构选择 隔离开关的操动机构有分相式和三相联动式两种。330~500 kV隔离开关采用分相式操动机构,220 kV及以下隔离开关则采用三相联动式操动机构。额定电流为8000 A及以上的户内式隔离开关通常采用电动操动机构。220 kV高型与半高型屋外配电装置中的隔离开关以及330~500 kV隔离开关,以采用电动操动机构为宜。当变电所内有空气压缩系统时,隔离开关也可采用气动操动机构。其他户内和户外式隔离开关通常均采用手动操动机构。

破冰要求 隔离开关要求在分合闸时具有一定的破冰能力,破冰厚度要求大于安装处的最大覆冰厚度。变电所的气候条件一般没有架空线路那样恶劣,通常不采用线路覆冰严重地区或重冰地区的覆冰数值,而按安装处的实际覆冰厚度作为对隔离开关破冰能力的要求。

接地刀闸要求 为保证电气设备和母线检修时的安全,每段母线上都装设1~2组接地刀闸,63 kV及以上断路器两侧的隔离开关和线路隔离开关的线路侧,都装设接地刀闸,也可选用一侧或两侧带接地刀(附加在隔离开关上的接地用的刀片)的隔离开关。对35 kV及以上隔离开关的接地刀,要求根据安装处的短路电流进行动稳定和热稳定校验,还要求采取措施避免在接地刀处于合闸状态时误合断路器。

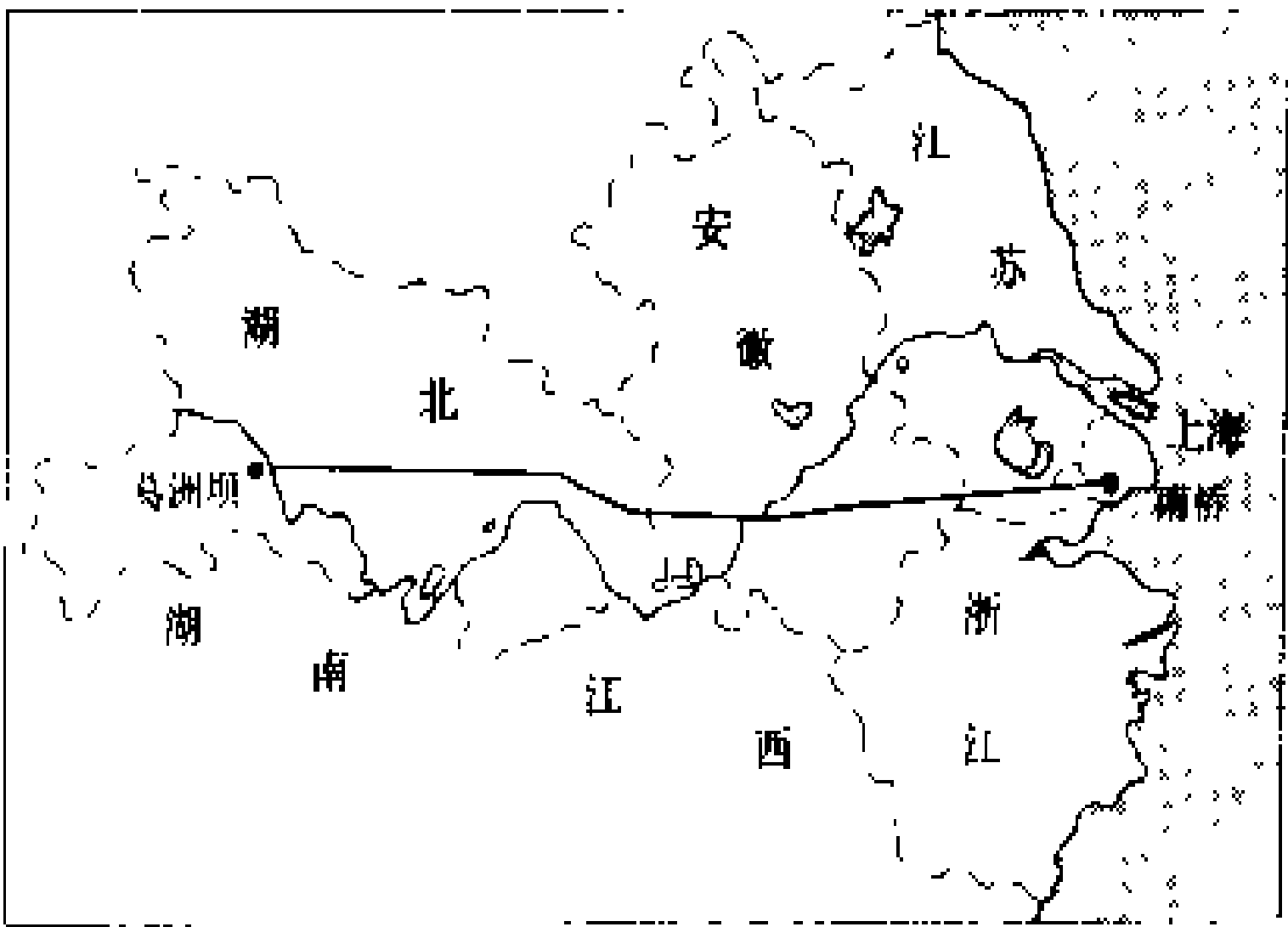
发展趋势 为了限制500 kV隔离开关分合电感电流和电容电流时产生的操作过电压,以及分合变压

器时产生的励磁涌流,有些国家采用在隔离开关静触头上加装电阻器的方法。苏联从1960年开始制造悬吊式隔离开关,它具有能破冰、自洁和减轻冲击等优点。采用悬吊式隔离开关可以提高屋外配电装置的运行可靠性,降低工程造价,压缩占地面积,减少瓷件数量,并能缩短母线长度等,这种隔离开关尚在完善过程中。随着500 kV远距离输电线路的出现,在平行架设双回线路的情况下,停电作业的线路将受到相邻带电运行线路的电磁感应,因此已提出研制能分合大电流的接地刀的要求。

(叶景星)

Gezhouba - Shanghai zhiliu shudian gongcheng  
**葛洲坝—上海直流输电工程** (Gezhouba - Shanghai HVDC transmission project) 中国第一条±500kV超高压直流输电工程。为了将水力资源丰富的华中电网丰水期多余的电力送往能源缺乏而经济发达的上海地区,配合装机容量为2710 MW的葛洲坝水电站二期工程送电,并为今后兴建大型水、火电站的西电东送和全国电力网发展提供新的输电方式,1984年10月国家批准建设本工程。

本工程送端葛洲坝换流站位于宜昌宋家坝,受端换流站位于上海市奉贤县南桥,途经湖北、安徽、江苏、浙江和上海,线路全长1045.7 km。其地理位置如图所示。



葛洲坝—上海直流输电工程地理位置图

输电线路的直流额定电压为±500 kV,额定电流1200 A,双极额定输送容量1200 MW;2 h过负荷容量1320 MW,10 s过负荷容量1500 MW;单极(或双极导线并联)一大地回路运行、单极—金属回路运行连续输送容量600 MW;直流电压降到70%额定值时,每单极连续输送容量300 MW。由南桥向葛洲坝方向双极输送容量为600 MW。葛洲坝换流站交流500 kV侧采用一个半断路器接线,南桥换流站交流220 kV

侧采用双母线双分段带旁路母线接线。

**主要设备及其技术特性** 本工程的直流输电设备及技术主要从瑞士BBC公司引进,由中国安装调试。

**换流阀组** 每极采用一个12脉动的四重阀组,额定电压500 kV,对地耐受直流电压650 kV;额定电流1200 A,最小电流120 A;额定容量600 MW,自然过负荷能力10%,10 s过负荷能力25%。每极共有 $\phi 80$  mm水冷、空气绝缘的晶闸管元件1440只。其主要参数为:额定电流1200 A,反向阻断电压5800 V,额定关断角 $18^\circ$ ,最大触发角 $57.1^\circ$ ,采用光电触发。每重阀都装有金属氧化物避雷器作为过电压保护。用去离子水作阀内元件一次闭环循环冷却水,由蒸发冷却塔来冷却二次冷却水。每极共三组四重阀,每组四重阀为8层,高9.25 m,宽5.4 m,厚4.5 m,重24 t,悬挂在阀厅顶上。

**换流变压器** 采用强迫油循环风冷单相三绕组Y,y,d接线变压器,二极共六台,外加一台作备用相。葛洲坝换流站每极换流变压器容量为712/366/366 MV·A,电压为 $\frac{525}{\sqrt{3}}/\frac{209}{\sqrt{3}}/209$  kV,带负荷调压抽头为 $525+(-6\%\sim+4\%)525$  kV,每级抽头为1%,共11级。南桥换流站每极换流变压器容量为672/336/336 MV·A,电压为 $\frac{230}{\sqrt{3}}/\frac{198}{\sqrt{3}}/198$  kV,带负荷调压范围为 $230+(-6\%\sim+15\%)230$  kV,每级1%,共22级。

**交流滤波器** 要求能将换流所引起的电压畸变率抑制到:每一次谐波小于1%,全部各次谐波电压畸变的总和不超过4%,对电话干扰系数不超过1%。葛洲坝换流站配四套11/12.94次谐波、二套23.8/36.23次谐波、每套容量各为67 Mvar的高通滤波器;南桥换流站配四套12次谐波、二套24次谐波的高通滤波器以及二套12/24次谐波的双调谐滤波器,共8套容量为87 Mvar。所有交流滤波器均由极控制系统控制投切。

**无功补偿** 葛洲坝换流站除由交流谐波滤波器提供无功功率之外,不单独另设无功补偿装置。南桥换流站因考虑一套交流滤波器退出运行,则增设一组87 Mvar的并联电容器组。

**平波电抗器** 采用户外空芯干式电抗器,每极各有两个各自独立的线圈串接在一起,电感为 $0.15+0.15$  H,额定电流1200 A。

**直流滤波器** 每极配置12/24次和12/36次双调谐滤波器,它们的一端接在两个串接的平波电抗器线圈之间,另一端接在同流电路,形成T型接法,能使极导线和接地极引线中的等效干扰电流在双极运行时

不超过150 mA,在单极—大地回路运行时不超过450 mA。经系统试验后,滤波器性能尚需改进。

**直流输电的控制和调节** 换流站将采用可编程的高速计算机PHSC控制系统和可编程的分散式数字计算机P13/42控制监测系统。对整个直流输电系统,换流站的控制及各个交流、直流开关场等全站运行操作、同期鉴定、联锁闭锁功能、参数测量、设备状态监测和故障报警等都实行了计算机控制。还配置了分辨率达1 ms的顺序故障记录仪和暂态故障录波仪,分析结果用自动绘图仪绘出。控制和测量设备完全实现双重化,在线检测各硬件的运行情况,一旦有问题自动切换到热备用状态的健全设备上去,可靠性得到很大的提高。控制系统的功率阶跃响应时间为120 ms,直流系统响应从直流线路故障开始到直流电流降为零历时为14 ms,从再启动开始到90%功率历时为76 ms,一极故障功率转换到健全极历时76 ms。

**直流输电的继电保护** 换流阀的保护有微机组成的差动保护和过电流保护;直流线路保护有行波保护、 $du/dt$ 保护和低电压保护;接地极引线保护有横向差动保护;换流变压器保护有谐波制动的大差动保护;交流滤波器保护有不平衡保护和过电流保护;直流滤波器保护有差动保护和过电流保护;还有VDCL保护等。

**直流输电的信道** 采用直流线路电力载波通信为主通道,在安庆设中继站。第1、2号信道用于调度电话和共线电话;第3、4号信道作为运行控制信道;第5、6号信道作为控制运行备用信道。微波电路也作为运行控制备用信道。

**直流架空线路** 导线采用国产 $4\times LGJQ-400$  钢芯铝线,分裂间距450 mm。直流绝缘子采用16 t和21 t级产品,等值附盐密度小于 $0.05\text{ mg/cm}^2$ 的地段每串采用34片。档距中央导线最大场强为26 kV/cm,线路边外20 m处1 MHz的无线电干扰不超过56 dB。全线共2681基铁塔,其中拉线塔1522基。两次跨越长江,一次跨越汉水。

**接地电极和接地极引线** 葛洲坝换流站接地电极位于其站址下游38 km,离长江岸1.5 km,采用直径500 m环状深度2 m的沟埋型接地极,电极材料用 $\phi 42$  mm碳钢埋在 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 断面的焦炭层中,导体总长1570 m,接地电阻 $0.039\Omega$ 。南桥换流站接地极离站址32 km,靠近杭州湾浅埋海岸电极,电极材料原用 $\phi 30$  mm碳钢埋在 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ 焦炭层,深埋2 m,二段320 m一字形敷设,接地电阻 $0.028\Omega$ 。1990年6月电极与引线连接处烧损,又因碳钢腐蚀速度比原设计值大,1991年改建用 $3\times \phi 50$  mm碳钢作电极。接地极引线用LGJ-400/50导线,按35

kV 架空线的绝缘水平建设。

本工程于 1985 年 10 月线路和换流站土建开工, 1987 年 9 月直流线路竣工, 1989 年 9 月第一极运行, 1990 年 8 月第二极和双极运行。葛洲坝—上海±500 kV 直流输电工程竣工投产, 标志了中国直流输电技术的重大进步。

参见彩图插页第 37 页 115 图。  
(郑代雨 杨秋琪)

gongpin guodianya  
**工频过电压** (power frequency overvoltage)

电力系统中在故障或操作等异常情况下出现的超过系统最高工作电压的工频或接近工频的过电压。产生工频过电压的主要原因是空载线路的电容效应、不对称接地故障和突然甩负荷等。因突然甩负荷引起的工频过电压见甩负荷过电压。

**电容效应** 在由电源电动势、电感和电容组成的串联回路中, 如果工频容抗大于感抗, 则回路中通过容性电流, 它在感抗上的压降使得电容电压被抬高的现象, 称为电容效应。

**暂时工频过电压和稳态工频过电压** 在正常运行情况下, 系统的母线电压不超过系统的最高工作电压  $U_m$ , 负载电流在电源漏抗上的压降, 使得电源的等效电动势  $E$  可能大于  $U_m$ 。当发生故障跳闸或进行操作时, 母线电压可能升高。因发电机中的磁链在瞬间时刻维持恒定和发电机自动电压调节器的惰性,  $E$  值暂时保持不变, 加上长线路的电容效应, 线路工频电压上升得较高, 称为暂时工频过电压。在经数百毫秒之后, 发电机自动电压调整器发生作用,  $E$  值和线路工频电压下降到较小的稳态值, 称为稳态工频过电压。

**空载长线路引起的工频过电压** 图 1 为  $l$  公里的空载长线路, 由于导线容抗大于感抗, 电容效应使得线路电压高于电源电动势  $E$ , 而且愈往线路末端, 电压愈高。离线路末端  $x$  公里处的电压  $U_x$  以末端电压  $U$  为基准, 按照余弦的规律下降, 可用下式表示

$$U_x = U \cos \lambda_x$$
$$U = \frac{E}{\cos \lambda - \frac{x_s}{Z} \sin \lambda} = \frac{E \cos \varphi}{\cos(\lambda + \varphi)}$$

$$\lambda_x = \omega x / v, \lambda = \omega l / v, \varphi = \arctg x_s / Z$$

式中  $x_s$  为电源等效漏抗;  $Z$  为导线波阻抗;  $\omega$  为电源电动势角频率;  $v$  为导线波速, km/s。可知  $x_s$  愈大,  $l$  愈大, 电容效应和工频过电压愈大。

**不对称接地时的工频过电压** 线路中的不对称接地故障也可使线路电压更加升高。令  $x$  公里处无故障时的三相对称电压为  $\dot{U}_{xA0}$ 、 $\dot{U}_{xB0}$  和  $\dot{U}_{xC0}$ , 在该处 A 相

接地时, 健全相的电压  $\dot{U}_{xB}$  和  $\dot{U}_{xC}$  为

$$\dot{U}_{xB} = \dot{U}_{xB0} + \Delta \dot{U}, \dot{U}_{xC} = \dot{U}_{xC0} + \Delta \dot{U}$$
$$\Delta \dot{U} = -\dot{U}_{xA0} \frac{k-1}{k+2}, k = \frac{Z_{r0}}{Z_{r1}}$$

式中  $Z_{r0}$  和  $Z_{r1}$  分别为从故障点向外看的零序和正序入口阻抗。

在 B、C 两相接地时, 故障点的 A 相电压为

$$\dot{U}_{xA} = \dot{U}_{xA0} \frac{3k}{2k+1}$$

$k$  值愈大, 健全相电压愈高。在 110 kV 及以上中性点直接接地的高压和超高压线路中, 通常有  $k=1\sim 3$ 。在  $k=3$  和不计导线的损耗电阻时, 可算出  $U_{xB}=U_{xC}=1.25U_{xA0}$ ,  $U_{xA}=1.29U_{xA0}$ 。如果考虑导线的损耗电阻, 则  $U_{xB} \neq U_{xC}$ 。

将故障点电压分解为正、负和零序分量, 分别引入

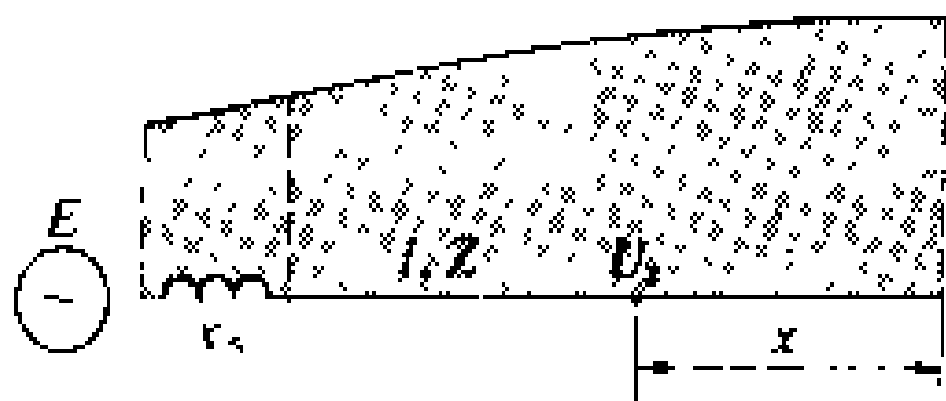


图 1 空载长线路中的沿线电压分布

序电压的传递系数, 可以求出各相的沿线电压分布。通常, 最大电压发生在健全相的末端, 同时, 空载长线路末端故障时的工频过电压最高。

**降低工频过电压措施** 通常在考虑降低电力系统中的过电压的措施时, 避雷器的选择决定于连接点最大可能的工频过电压, 长线路中的操作过电压则在工频过电压的基础上振荡产生, 因此为了降低雷电过电压和操作过电压, 首先应当考虑降低工频过电压。目前, 中国 500 kV 电力系统中一般要求母线和线路侧电压分别不超过  $(1.3\sim 1.5)U_m$ 。在计划性分合闸时, 可在电源容量较小

的一侧先分闸, 在电源容量较大的一侧先合闸, 从而使等值漏抗  $x_s$  和相应的过电压下降。

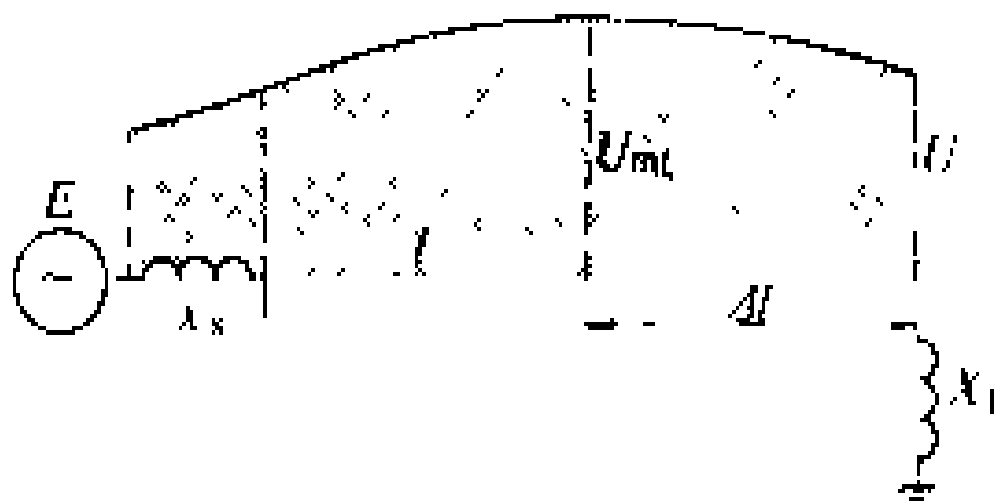


图 2 并联电抗器接在空载长线路末端时的沿线电压分布

**实际的超高压线路** 往往较长, 工频过电压很高, 需在线路上设置并联电抗器以削弱电容效应。图 2 为电抗器  $X_L$  接在空载线路末端的情形, 最大工频电压  $U_{mL}$  发生在离末端  $\Delta l$  公里处, 并按余弦的规律向两侧下降, 可用下式表示

$$U_{mL} = E \frac{\cos \varphi}{\cos(\lambda + \varphi - \Delta \lambda)}, U = U_{mL} \cos \Delta \lambda$$

式中  $\Delta \lambda = \omega \Delta l / v = \arctg Z / X_L$ 。故有  $U_{mL} < U$ 。这样, 就

最大工频过电压来说,并联电抗器的采用相当于将线路长度缩短到  $(l-\Delta l)$  公里。适当地选择并联电抗器的容量、数量和安装位置,可使沿线工频过电压降至预定水平以下。

(陈维贤)

gongpin naishou dianya

**工频耐受电压** (power frequency withstand voltage) 电气设备所能耐受的工频电压,分短时(1 min)工频耐受电压和长时(1~2 h)工频耐受电压两种。电气设备在运行中要承受工作电压、工频过电压、操作过电压及雷电过电压的作用。为考验绝缘耐受各种电压的能力,通常除了型式试验要进行雷电冲击和操作冲击耐受试验外,一般只作短时工频耐受试验。因为在某种程度上,操作或雷电冲击电压对绝缘的作用可用工频电压来代替,并且可使试验工作方便可行,所以通常以短时工频耐受电压代表绝缘对操作过电压、雷电过电压总的耐受水平。

在中国,根据运行经验和技术经济比较,电气设备的工频耐受电压分内绝缘和外绝缘两方面分别确定。

内绝缘工频耐受电压的确定 先以操作过电压水平为基础,计算工频耐受电压(有效值)

$$U_{in,50\sim} = \frac{1.1K_0U_p}{1.3 \sim 1.35} = (0.56 \sim 0.54)K_0U_n, \text{kV} \quad (1)$$

式中  $K_0$  为计算用内部过电压倍数;  $U_p$  为系统最高运行相电压;  $U_n$  为系统额定线电压,  $U_p = 1.15U_n/\sqrt{3}$ ; 1.1 为内绝缘的累积系数; 1.3~1.35 为内绝缘的操作冲击系数,是承受操作过电压能力与承受短时工频电压能力的比值,对 60 kV 及以下设备取 1.3, 110 kV 及以上设备取 1.35。再以雷电过电压为基础计算

$$U_{out,50\sim} = \frac{1.1(1.1U_s + 15)}{1.48 \sqrt{2}}, \text{kV} \quad (2)$$

式中  $U_s$  为避雷器 5 kA 时的残压;  $1.1(1.1U_s + 15)$  是电气设备全波冲击绝缘水平;  $1.48 \sqrt{2}$  是内绝缘的雷电冲击系数。选择  $U_{in,50\sim}$  和  $U_{out,50\sim}$  中较大值为内绝缘短时工频耐受电压值。

外绝缘工频耐受电压的确定 在干燥状态下外绝缘所应耐受的电压称外绝缘工频干试耐受电压,可按下式确定

$$U_{od,50\sim} = \frac{1.1K_0U_n}{0.84 \sqrt{3}} = 0.79K_0U_n, \text{kV} \quad (3)$$

式中 0.84 为海拔 1000 m 及以下地区考虑空气密度和湿度的综合修正系数。在淋雨状态下外绝缘所应耐受

的电压称外绝缘工频湿试耐受电压,可按下式确定

$$U_{ow,50\sim} = \frac{1.15K_0U_n}{1.015 \sqrt{3}} = 0.654K_0U_n, \text{kV} \quad (4)$$

式中 1.015 是综合考虑大气条件、雨水状态和污秽情况等各种因素影响的修正系数。外绝缘工频耐受电压主要是工频湿试耐受电压,工频干试耐受电压只对室内电气设备的外绝缘适用。

中国国家标准 GB311.1《高压输变电设备的绝缘配合》第 3.6.2 条规定了 3~500 kV 输配电设备的 1 min 工频耐受电压值。

考虑到在运行电压和工频过电压作用下内绝缘老化和外绝缘耐污性能,对某些电气设备还规定有长时工频耐受电压。对超高压电气设备,考虑到操作冲击波对绝缘作用的特殊性,以及不能肯定操作冲击电压与工频电压之间的等价程度,故仍规定操作冲击耐受电压,而不用工频耐受电压代替。

(方 瑜)

gongdian fangshi

**供电方式** (mode of electric power supply)

供电部门向用户提供的电源特性和类型。更广泛的含义,还包括用电方式、计量方式、管理关系等内容。供电方式的选择要保证供用电的安全、经济、合理和不影响其它用户用电,要根据用户的用电性质、容量,结合电网规划及当地的供电条件来确定。

**电源特性** 指电源的频率、额定电压和电源容量。

频率 当今世界各国的电力系统都以交流电源作为供电电源,并规定了供电的额定频率。如中国和欧洲各国的额定频率为 50 Hz,美国主要为 60 Hz,日本为 50 Hz 和 60 Hz 并存。

额定电压 对不同容量和性质的用户,相应采用不同的电压供电。各国供电系统都结合本国具体情况规定了供电额定电压的标准。中国国家标准规定可供选择的配电网供电额定电压:高压为 110、63、35 kV,中压为 10 kV,低压为 380 V (三相)、220 V (单相);除发电厂直配电压可采用 3、6 kV 外,其余的配电电压应逐步过渡到上述额定电压。供电额定电压的选择通常是根据用电容量的大小来决定的。中国目前规定,一般用户用电设备的容量在 250 kW 或需用变压器的容量在 160 kV·A 及以下者,应以低压方式供电。在特殊情况下,对供电可靠性要求很高或用电性质特殊的用户(如机要通信、广播电视、计算中心等)及用电负荷(冲击负荷、非线性负荷等)会对电力网的电能质量产生不良影响的用户和某些临时性用电的用户,也可用中压或高压方式供电。中压及高压供电的各级电

压的最高容量界线，要根据安全、经济和节能的原则确定。

**电源容量** 指电源在最大和最小运行方式时的短路容量。确定电源容量，主要是为了用户的设备选型，以及使某些特种负荷所引起的电压波动或产生的谐波分量能在规定限度以内。

**供电方式类型** 由电源相数、电源数量、供电回路数等具体指标决定。

**电源相数** 一般可分为三相三线制、三相四线制、单相两线制和单相三线制。三相三线制用于高、中压配电线路及部分低压配电线路，其余方式用于中、低压配电线路。三相三线是指供电的三根导线为三根相线，如同时需要单相供电，则可加上一根中线，成为三相四线制。单相两线由一根相线和一根中线组成，单相三线则由单相变压器绕组首、末两端引出线作为两根相线，绕组中心引出线作为中线组成，这种供电线路在有的国家（如日本等）时有使用。此外，有的国家的某些地区利用大地作为一相导线，与其它两相导线组成“两线一地制”（见两线一地制配电），实现三相供电。两线一地制的优点是节约了导线材料和线路器材，并可减少线损。但其安全性较差，接地装置的要求高，受电端如不采取措施，三相电压将不对称，对通信线路的干扰影响很大。故两线一地制一般只在农村或偏僻地区作高、中压配电线路用，而不适用于低压配电线路，在城市里不允许采用两线一地制供电。

为保证供电系统安全经济运行，尽量做到三相负荷的平衡，各国配电网的高、中压供电，除个别情况采用单相供电外，一般都采用三相供电。低压大容量用户大多也为三相供电，容量较小的则采用单相供电。中国配电网中，高、中压用户都采用三相三线制供电；在用户装有三相用电设备或虽只装单相设备但计算负荷电流超过 30A 的低压用户，也采用三相四线制供电；计算负荷电流在 30A 以下且只有单相用电设备的低压用户，才采用单相两线制供电。在三相供电时，应尽可能将单相负荷平均分配在各相上。

**电源数量** 对一般用户，大多以一个电源供电。但对中断供电后会造成人身伤亡或重要设备损坏、连续生产过程长期不能恢复以及环境严重污染或政治上有重大影响的重要用户，除正常供电电源外，要有保安电源，还可应用户要求提供备用电源。正常电源和保安、备用电源要来自两个独立电源。独立电源是指来自不同的变电所（或发电厂）的电源，或虽来自同一变电所但是互不影响的不同母线段引出的电源。在某些特殊场合或由配电网提供保安和备用电源不经济时，通常由用户自备保安和备用电源。

**供电回路数** 当供电线路容量能满足用户用电容

量时，一般用户常用单回路供电；用电容量较大时，可用双回路或多回路供电，这样不仅可满足用电容量，还可提高供电的可靠性。

（金辅夏）

guti jiya juhe dianlan

**固体挤压聚合电缆** (solid extruded polymeric insulated cable)

以高分子聚合物作为绝缘的电力电缆，也称橡塑电缆。所用的高分子聚合物有聚氯乙烯、聚乙烯、丁基橡胶、乙丙橡胶和交联聚乙烯，按所用的高分子聚合物的不同，常用的固体挤压聚合电缆可分成聚氯乙烯电缆、聚乙烯电缆、交联聚乙烯电缆和乙丙橡胶电缆。根据高分子聚合物的电气和物理性能，不同的固体挤压聚合电缆适用于不同场所或不同电压等级的电力电缆线路。固体挤压聚合电缆一般由导体、导体屏蔽、绝缘、绝缘屏蔽、金属套和外护层构成。

**导体** 由铜单线或铝单线同心扭绞构成，一般为紧压导体，对大截面（ $>600\text{ mm}^2$ ）导体则采用分割导体。通常海底电缆的导体具有纵向水封性能。

**导体屏蔽** 用挤压的方法将半导电塑料或半导电橡胶挤压在导体表面构成导体屏蔽层，它不仅改善导体表面的电场分布，而且还具有消除导体与绝缘层之间气隙的作用。导体屏蔽层的体积电阻系数一般为  $10^2\sim10^5\Omega\cdot\text{m}$ 。体积电阻系数过高会使电缆介质损耗增大，过低会引起电缆绝缘的冲击电压强度降低。

**绝缘** 固体挤压聚合电缆绝缘常用的高分子聚合物可分成热塑性和热固性两种。热塑性的有聚氯乙烯和聚乙烯，热固性的有丁基橡胶、乙丙橡胶和交联聚乙烯。热塑性固体挤压聚合电缆在温度较高时，会塑性变形，因此其最高运行温度通常规定不高于  $70^\circ\text{C}$ ，而热固性固体挤压聚合电缆的最高运行温度可达  $90^\circ\text{C}$ 。

**绝缘屏蔽** 由半导电屏蔽层与金属屏蔽层组成。半导电屏蔽层所用的材料，大体与导体屏蔽的相同，6 kV 及以上的挤压聚合电缆都有绝缘屏蔽层。导体屏蔽层、绝缘半导电屏蔽层通常和绝缘层一起挤出（三层同时挤出或串联挤出）。35 kV 及以下电缆绝缘的半导电屏蔽层在有些场合采用可剥离的。为了避免电缆热膨胀时在绝缘和金属屏蔽上产生太大的压力而引起电缆绝缘的变形，有时将绝缘的半导电屏蔽层做成特殊的形状，如采用带槽的屏蔽层、可压缩的衬垫等，以迅速吸收绝缘层的径向热膨胀。金属屏蔽层由二层铜带或一层铜线构成。金属屏蔽层的作用是保持零电位，并在故障时承载短路电流，以免因短路电流引起电缆温度过高而损坏绝缘层，其截面积由短路电流决定。

**金属套** 63 kV 以上的固体挤压聚合电缆，一般

要有由金属膜与塑料带组成的防水综合护层。220 kV 及以上的电缆一般都要求具有密封金属套，如铅套或皱纹铝套。

**外护层** 通常由挤出的聚氯乙烯或聚乙烯套构成。当电缆的机械性能需要加强时，护套分内外两层，在两层之间用钢带或钢丝铠装。

**发展过程及趋势** 美国在 1944 年敷设了第一根 3kV 的聚乙烯电缆。在其后固体挤压聚合电缆的发展相当缓慢，但从 20 世纪 60 年代起，取得了迅速的发展。至今，在许多国家 150 kV 及以下的固体挤压聚合电缆的产量已经超过了纸绝缘电缆，尤其在中、低电压范围内，大有取代纸绝缘电缆的趋势。目前固体挤压聚合电缆在工业应用中的最高电压等级是法国的 400 kV 聚乙烯电缆以及日本的 275 kV 交联聚乙烯电缆，500 kV 交联聚乙烯电缆在日本也进入试验性实用阶段。

参考书目

刘子玉，电气绝缘结构设计原理，北京：机械工业出版社，1981

McAllister D. Electric Cables Handbook. Granada Publishing Limited, 1982

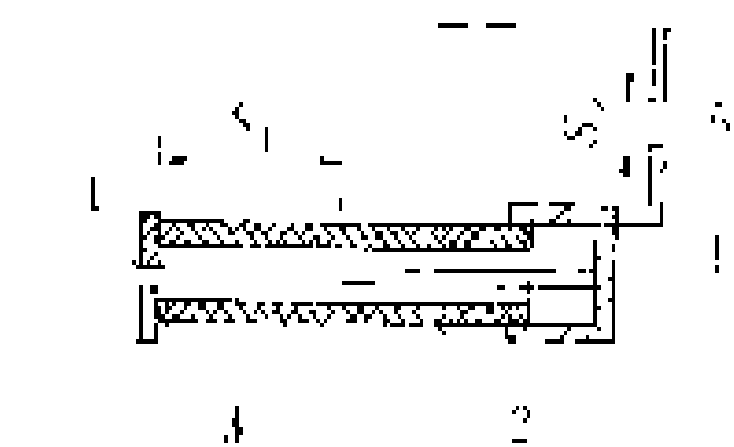
(桑纪明)

guanshi bileiqi

管式避雷器 (tube type surge arrester)

利用产气材料在电弧高温作用下产气以熄灭工频续流电弧的避雷器，亦称排气式避雷器。

图示为管式避雷器的结构原理图。其基本元件是安装在产气管内的放电灭弧间隙（称之为内间隙），由棒形和环形电极构成。产气管可用纤维、塑料或橡胶等材料制造。为避免产气管受潮发生沿面放电而造成避雷器的误动，在使用时一般均串联外间隙。



管式避雷器结构原理图  
1—端盖；2—产气管；3—内电极；4—喷气口；5—外电极；  
S<sub>1</sub>—内（灭弧）间隙；S<sub>2</sub>—外（隔离）间隙

当作用在避雷器上的过电压达到间隙的放电电压时，外间隙和内间隙将相继放电，将过电压的电荷导入大地。在过电压消失后，避雷器将继续通过工频短路电流（即续流）。在工频短路电流电弧的作用下，产气管会分解出大量气体，由环形电极的开口孔喷出，产生强烈的吹弧作用，将电弧熄灭。

管式避雷器的熄弧能力与被开断的续流的大小有关。续流太小时产气太少，将不能熄弧；续流太大时产

气过多，又会使产气管爆裂。因此，管式避雷器所能开断的续流有一定的上限和下限。

管式避雷器的伏秒特性比较陡峭，不易和被保护设备的绝缘特性相配合，而且放电后会产生截波，不宜用来保护有绕组的设备的内绝缘。

管式避雷器自 20 世纪 30 年代开始得到应用，也曾研究过一些办法来改善其伏秒特性，并出现过派生的无续流避雷器，但都因结构复杂或造价增加而得不到发展。在中国，管式避雷器用作 35kV 及以下发、变电站的进线保护和线路上的弱绝缘保护。在其他国家应用得不多。

参考书目

机械工程手册 电机工程手册编辑委员会，电机工程手册，第 28 篇 避雷器，北京：机械工业出版社，1978

(李启盛)

guodianya

**过电压 (overvoltage)** 超过正常运行电压并对电气设备绝缘有危险的电压升高。过电压学科主要研究过电压产生的机理及其防护措施和设备。电力系统中的事故以绝缘事故占多数，其中大部分是由过电压所造成的绝缘破坏。过电压的研究，是绝缘配合与合理确定电气设备绝缘水平以及减少绝缘损坏事故的基础。

**分类及产生机理** 电力系统过电压按其产生的机理可分为雷电过电压和内部过电压，前者是由于自然界的雷电放电引起的，又称大气过电压或外部过电压；后者是由于电力系统内部电磁能量的转化或传递引起的。内部过电压又可分为两种，一种是因操作或故障引起的过渡过程电压升高，称操作过电压；另一种是过渡过程结束后出现的各种持续时间较长的工频过电压和谐振过电压，统称为暂时过电压。电力系统过电压也可按其波形特点来分类：一类是雷电过电压或操作过电压，另一类也称暂时过电压。前一类过电压的波形特点为只有一个最大值必须加以考虑，为研究它们对设备绝缘和保护装置的影响，在试验时可以用短波前的雷电冲击波或长波前的操作冲击波来代表。后一类过电压是持续性的或者具有几个最大值，其最大值无衰减或衰减极慢，与工频过电压或某种谐波频率的过电压相近似。这种分类中，雷电过电压未必总是起源于雷电，操作过电压也未必总是起源于操作或故障。例如切除空载电力变压器时，或者在产生“相”对“地”的故障时，可以产生与雷电过电压类似的陡波前的过电压，而另一方面，经变压器绕组间的磁感应耦合传递的雷电波，可在变压器二次侧产生类似操作时的长波前的

过电压波。过电压的波形决定了过电压对设备绝缘和保护装置的影响,在制订设备绝缘水平标准时将过电压按波形特点分类比较方便。按波形特点分类时,暂时过电压通常包括接地故障、负荷突变以及线性谐振和铁磁谐振引起的过电压。

雷电过电压又可分为直击雷过电压和感应雷过电压,前者是雷直击于电力系统时产生的,后者是在电力系统附近发生雷电放电时产生的。直击雷又可分为绕击(见避雷线)和反击两种情况。

研究内容及研究方向 过电压是引起电力系统事故及故障的主要原因之一,因之进一步降低内、外过电压的水平是一项十分重要的课题。在20世纪初期,由于电力系统额定电压不高,绝缘水平较低,输电线路长度不大,落雷机会较少,所以着重于感应雷过电压的研究与防护。30年代以后,随着电力系统额定电压的提高与输电线路长度的增大,直击雷过电压成为主要的研究与防护对象。50年代以后,随着电力系统额定电压的进一步提高,又由于内部过电压的值大致与系统的额定电压成正比,所以内部过电压对于高压、超高压和特高压系统的绝缘水平的选择起着很大的作用。

(1)在外部过电压方面,当前主要是深化对雷电机理的研究,包括对雷电的各种电磁学、光学及热力学等参数的观测,以及对雷云放电过程的模拟实验研究和电子计算机的仿真研究;其次是探索防直击雷的新技术,这是因为避雷针、避雷线的作用是引雷,会造成反击、绕击及感应雷击事故,对高杆塔或大档距的输电线路保护不够理想,对电力系统通信、控制及计算机系统的保护更难以满足要求;再次是进一步改善避雷器的特性,例如提高容量、降低残压及改善老化性能(如采用金属氧化物避雷器),以进一步降低设备的冲击绝缘水平。

(2)在内部过电压方面,是研究进一步降低操作过电压的措施及防止谐振过电压的有效办法,例如改进断路器分合闸电阻以及复合避雷器与并联电抗器的性能,探索降低内部过电压的新技术(如整流器-电解电容器装置)等。

(3)过电压分析计算技术也是研究的基础手段之一,已受到普遍的重视。人们认为,将作用于电气设备绝缘上的大气过电压,由现在的 $(2.5 \sim 4.5) \sqrt{2} U_{pm}$  ( $U_{pm}$ 为最大运行相电压)降低到 $2.2 \sqrt{2} U_{pm}$ 以下,将内部过电压由现在的 $(2.5 \sim 3.5) \sqrt{2} U_{pm}$ 降低到 $2 \sqrt{2} U_{pm}$ 以下,是完全可能的。

参考书目

解广润主编,电力系统过电压,北京:水利电力出版社,1986

出版社,1986

刘继,电气装置的过电压保护,北京:电力工业出版社,1982

Greenwood A. Electrical Transients in Power Systems. Wiley-Interscience, 1971

(解广润)

guodianya jisuan

过电压计算 (overvoltage computation)

包括线性、非线性、集中和分布参数的稳态及暂态计算,是过电压分析的一个重要手段。

长线的雷电过电压计算通常采用彼得逊法则和建立在行波基础上的网格法。在内部过电压计算中,除网格法外还采用建立在混合波基础上的特性线法(也称贝热龙法)。在多导线的波过程计算中还要用到相模变换法。在进行变压器绕组中的波过程计算时,采用把沿绕组分布的电压波分解为无穷多个在时间上按各自的固有频率振荡的各级驻波的方法。

在近似计算时,分布参数的元件也可用集中参数代替,例如用Γ形或Π形链状回路代替长线和变压器绕组,在雷电过电压计算时用集中的入口电容代替变压器。在链形回路的计算中可采用差分法。

在研究铁磁谐振的稳态解时需要解非线性方程,常用的主要方法有:①图解法和图解分析法;②相平面法(只确定解的稳定性,不求解的最终结果);③精确解近似方程法(将非线性方程用近似函数代替);④近似解精确方程法(小参数法及其各种变化形式)。

无论是雷电过电压或内部过电压,都具有统计的性质,所以在过电压计算中需引入概率理论。大型复杂的电力系统中的过电压计算,可在电子计算机上用专门的数值计算程序来完成,常用的有通用电磁瞬态程序(简称EMTP)。

(陈慈莹)

guodianya mofa

过电压模拟 (overvoltage modeling)

用

物理模拟装置对电力系统过电压进行分析的方法。通过过电压模拟可以形象地深入了解过电压的发展过程,以便采取措施干预或消除这种过程产生。用来分析雷电过电压的模拟装置称防雷分析仪。用来分析内部过电压的模拟装置称内部过电压模拟装置,又称暂态网络分析仪(TNA)。在模拟装置中,输电线路用由电感、电容、电阻和泄漏电导组成的链形回路模拟;电力变压器用模型变压器或入口电容模拟;断路器和避雷器的间隙用品闸管配合电子线路模拟;避雷器的阀



片用非线性电阻整体模拟，或用线性电阻配合电子线路分段模拟。

(陈慈萱)

guodu dianlan jointou

**过渡电缆接头** (transition cable joint)

实现二种不同型号的电缆相互连接的电缆接头。二种绝缘材料相同而型号不同的电缆的过渡电缆接头，相似于直线电缆接头，不同绝缘材料的电缆的过渡电缆接头相似于塞止电缆接头。在老的电缆线路需要延长或改道又不能取得同样结构的电缆时，过渡电缆接头常是工程的关键部件。但由于过渡电缆接头连接电缆的种类各异，而需求数量又不多，因此无定型的结构，通常是在需要时临时设计制作。

导体连接 绝缘材料相同的电缆的导体可以按直线电缆接头常规的方法连接，绝缘材料不同的电缆的

导体用堵油连接管或塞止电缆接头的方法连接。

绝缘恢复 用过渡电缆接头实现固体挤压聚合电缆与油浸纸绝缘电缆的连接时，连接前需将任一侧电缆作防油处理，如采用耐油热收缩管或用耐油橡胶带紧密绕包。用过渡电缆接头实现固体挤压聚合电缆与充油电缆连接时，用与塞止电缆接头相似的环氧树脂套管，也可分成双腔或三腔式。用三腔式过渡电缆接头时，中腔和充油电缆侧的油腔连通，在固体挤压聚合电缆腔另装设填充剂补偿器。

接头壳体 用过渡电缆接头实现分铅型电缆与屏蔽型电缆连接时，接头壳体相似于分支匣，即壳体的一侧为单孔用于屏蔽型电缆，另一侧为三孔用于分铅型电缆。其它过渡电缆接头的壳体与直线电缆接头壳体相同。

(李懿芬)

# H

Haershilongge Haierxinbao shudian xianlu

**哈尔什龙厄—海尔辛堡输电线路** (Harspranget - Halsingborg transmission line)

世界上第一条 380 kV 输电线路,从瑞典哈尔什龙厄水电站到瑞典最南端海尔辛堡变电所,全长约 1374 km。第一期工程由哈尔什龙厄水电站经梅德斯库格至哈尔斯贝里变电所,线路长度 954 km,输送容量 400 MW,于 1952 年 4 月投入运行。1954~1955 年,在梅德斯库格—哈尔斯贝里线路距两端变电所各三分之一的线路长度处,装设了两组串联电容补偿设备,每组容量为 105 Mvar,总补偿度为 40%,使一期线路的输送容量提高到 600 MW。第二期工程由哈尔斯贝里经哥德堡到达海尔辛堡变电所,长度约 420 km,于 1956 年秋投入运行。

该线路导线采用每相二分裂截面为  $593 \text{ mm}^2$  的钢芯铝绞线,分裂间距为 45 cm。钢芯铝绞线直径为 31.7 mm,铝截面为  $525 \text{ mm}^2$  (见分裂导线)。架空地线有两根,每根截面  $136.2 \text{ mm}^2$ ,保护角为  $24^\circ$ 。

线路绝缘水平按内部过电压为 2.5 倍相电压设计,相间距离 12 m。绝缘子串用 20 片瓷绝缘子,串长 4.2 m,正常工作拉力 40 kN。此外,也使用了一部分玻璃绝缘子。

杆塔为自立式门型铁塔,导线水平排列,呼称高 22.7 m,平均档距 327 m,横担长 24 m。塔腿由三段组成,中段可根据需要选用。

该线路每千米约 3.1 基铁塔,铁塔耗钢量 22.1 t/km,导线 11.94 t/km。每千米造价 137500 瑞典克朗。

(胡维新)

haidi dianlan

**海底电缆** (submarine cable)

敷设于江河、湖泊、海域水底下的电力电缆,亦称水底电缆。它与陆上电缆相比,在主绝缘方面没有多大差异。由于海底电缆的特殊施工方法和运行条件,在金属套、铠装等结构方面有较大的不同。

铠装 海底电缆要承受大的机械拉力,因此它的

铠装一般都采用镀锌粗钢丝(钢丝直径在 6 mm 及以上),有的还使用双层钢丝。为了减少单芯海底电缆的护层损耗,也有使用抗张强度较高的非磁性材料,如铜丝或铝合金丝作为铠装。

海底电缆常制造成大长度的整根电缆,它的运输需盘成圈状。虽然节距短的铠装,可以减小盘绕直径,但在敷设过程中受到较大张力时,短节距(8 倍铠装平均直径)铠装的海底电缆,在水底容易打结,因此一般的铠装节距需 12~14 倍铠装平均直径。为了减小盘绕直径,有的采用短节距预应力钢丝或双层钢丝的铠装,也有的采用内外层扭绞方向相反的铠装。

金属套 海底电缆的金属套除了为防护目的增加必要的厚度外,还需要按水域的不同采取不同的结构。未能埋在河床下面的海底电缆,受到水流冲击而振动,金属套容易疲劳,甚至蠕变开裂,因此要采取措施提高疲劳耐振性,可选用周期性应变较大的合金作金属套,也有的采用复合套(如双层铅套,铅套之间涂沫沥青,或内层铅套,外层氯丁橡胶套等其它类似结构)。敷设在海底的海底电缆,还容易受到各种侵蚀,如盐浓度较高的海水、潮汐电流和浮游生物等,要针对不同水域,采取必要的耐腐蚀措施,如塑料护套可防止化学的或电性的腐蚀,铜包带可防止凿船虫生物腐蚀。

制造长度 海底电缆一般整根制造,长度较大,超过工厂常规的生产长度时,常用厂制电缆软接头连接。由于海底电缆的铠装是连续生产,软接头的外形及电性能需与电缆本体相同。此外,当金属套绝缘强度不能承受侵入波反射叠加电压时,在整根电缆的中间,金属套和铠装应有电气连接,防止损坏金属套。

发展情况 世界各国已越来越重视海底电缆的应用,尤其是沿海国家,有较长的海岸线和很多岛屿,从大陆向岛屿供电或岛屿之间的联网,都需要用海底电缆。早在 1915 年,丹麦与瑞典海峡间就敷设了一条电压等级为 20kV 的海底电缆,输送容量为  $6 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。1951 年在日本明石海峡,敷设了世界上第一条 22 kV 海底充油电缆。1973 年在丹麦与瑞典的厄勒/松德(Oresund/Sound)海峡敷设了世界上第一条 420kV 交流海底充油电缆,输送容量为  $870 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。不论直流的还是交流的海底电缆,都在向更高电压、更大容量方向发展。

参见彩图插页第 30 页 94 图。

(许精潜)

haidi dianlan fushe

**海底电缆敷设** (submarine cable laying)

敷设在水底下的一种电缆安装方式。用于输配电电缆线路跨越内河、大江、海峡,或者向岛屿和石油平台

供电。海底电缆敷设常因跨越水域不同,其敷设方法也有较大差别。海底电缆敷设不但要满足设计要求,还要根据具体工程选用最佳敷设方法及相应装备。

**设计要求** 敷设海底电缆的设计常由水域的宽度、水深、通航船舶的吨位和水文资料而定。其中主要有路径选择、海底电缆运输包装和埋设深度。

**路径选择** 可分为内河、大江和海峡三类:①筑有护岸的内河一般选取狭窄河段为电缆线路路径,但不宜过于接近内河上各种建筑,如桥梁的桥墩或码头区。②大江、大河的电缆线路路径宜选择在河床由泥、砂和砾石等构成的稳定水域,岸线无冲刷和不是船只锚泊或避风地段,不宜选在岸线凸出地带,而宜选在岸线凹入有淤积的地段。单向水流的江河,电缆线路常敷设成向上游的弧形,受潮流影响有倒流的江河或河床常受冲刷及淤积多变的水域,电缆线路常敷设成蛇形。③海峡、岛屿和石油平台间的电缆路径除了与大江、大河的相似要求外,尚需作周密的海洋调查,要避让没有覆盖层的基岩裸露地段,必要时选取弯曲的路径或将基岩在水下爆破成电缆沟,将电缆纳入沟中。

**海底电缆运输包装** 有盘装、筒装和圈装三种,按电缆长度、重量和外径而定。①盘装电缆适用于长度约 2 km 左右海底电缆的包装。当电缆长度超过电缆盘的容量和运输的条件时,要采取筒装。盘装的电缆类似于陆上敷设电缆,施工用具和施工方法较为简单。②电缆单根长度超过盘装的条件时,采用筒装。在制造大长度海底电缆过程中,将要交货的整根电缆围绕储存在圆筒形的电缆仓内,在出厂时将电缆自仓内拉出经栈桥送至码头。先将装电缆的托盘或圆筒放在运输船上,当电缆送至托盘的顶上,经导轮将电缆送下,在托盘内一匝一匝、一层一层围绕装载。筒装电缆在运输中通常用大型浮吊或运输船上的吊杆装卸,一般都不经陆上运输,而是从运输船直接卸至敷设船上。筒装电缆敷设用具较复杂。由于筒内的围绕电缆每放出一圈,电缆要扭转 360°,要在电缆筒上方安装一定高度的退扭架,使每米电缆的扭转角在允许值之内。从而使施工船的装备复杂化。③当单根电缆的重量超过起吊设备的能力时,采用圈装包装及运输,将电缆直接围绕在船舱内或甲板上,也称散装圈装,也有将电缆围绕在敷设船的转盘上。圈装电缆不受电缆长度的限制,但运输不如盘装或筒装简便,此外圈装电缆还多过驳一次,使电缆多一次弯曲及扭转,对电缆质量有一定影响。圈装电缆的敷设一般使用垂直退扭架,有的也采用转盘敷设,在装载及敷设的专用船上不设退扭架,而由栈桥将电缆自转盘出口处送至入水槽。这样电缆不会在装载及敷设过程中因围绕而扭转。这种船只特别适用于超高压海底电缆的敷设。

**埋设深度** 按通航船舶的吨位和河床的土质可分为浮埋、浅埋和深埋三种。①浮埋是将电缆敷设在河床上后,利用电缆自重下沉或放在坚硬的泥质河床上,也有用水泥装入麻袋中,覆盖在电缆上。浮埋一般适用于不通航或船只稀少的内河航道。在船只锚链长度不及水深的海洋中或没有抛锚可能的海域内,也有不覆盖水泥袋直接将电缆放在河床上的方式。②浅埋是将电缆敷设在水底后,用高压水泵将电缆周围泥沙吹散,利用电缆的自重沉入泥土中,深度一般可达 1 m 左右。浅埋适用于小型船只出入的水域和海底电缆接近堤岸浅滩登陆地段。③深埋是将电缆敷设在河床下,其深度大于通航船只的锚齿长度,一般在 3~5 m 左右。深埋适用于大型船舶往来的海域。深埋的方法可以用电缆埋设机,也可用挖泥船将河床挖成需要深度的电缆沟,待电缆敷入沟内后覆土回填。

**敷设方法及装备** 敷设海底电缆时,电缆牵引端常固定在电缆线路的一侧,敷设船向对岸航行,边航行边敷设电缆。由于海底电缆铠装的退扭力远大于陆上电缆,防止增加扭力和消除退扭力是海底电缆敷设的特点之一。海底电缆敷设时的关键操作一是要控制敷设船按设计路线航行,航行轨迹如远离原设计路径时,电缆长度会不够;二是要控制好电缆放出的速度与敷设张力,以保证在敷设过程中电缆不会打结。按照电缆的包装方式和埋设深度选用恰当的退扭方式和敷设机具。

**盘装敷设** 由于电缆盘能在盘轴上转动,电缆只有装盘退扭力,只要敷设船按电缆设计路径航行,盘转动时放出的电缆因自重而沉入水底。然后按需要,可进行埋深工作。盘装敷设的机具有:电缆盘的支架及轴、控制电缆放出速度和张力的制动装置及履带牵引装置、导轮或滑槽、张力监视装置、尺码计和入水槽等,这些机具是海底电缆敷设的基本机具,盘装敷设、筒装敷设和圈装敷设三种敷设方式都要使用。

为了防止电缆在敷设过程中打结,在敷设时要按水深控制电缆的入水角和张力。张力、水深、电缆重量和入水角之间的关系可用下面近似计算公式表示

$$T = \frac{HW}{1 - \cos\alpha}$$

式中  $T$  为敷设时的电缆张力, N;  $H$  为水深, m;  $W$  为电缆在水中的重量, kg/m;  $\alpha$  为电缆入水角, 度。

**筒装敷设** 电缆在圈入筒时,每一匝电缆扭转 360°,使电缆内有扭转应力,在放出时要让电缆退扭消除扭转应力。因此,筒装电缆敷设时,需有足够高度的退扭架,其高度通常不低于筒装电缆内圈的周长或外圈的直径。通常用电缆履带牵引机将电缆拉至退扭架,电缆通过退扭架和倾斜滚轮通道架后,可以采取和盘



装电缆相似方式进行敷设。

圈装敷设 可分为转盘圈装敷设和散装圈装敷设两种。①转盘圈装敷设是将电缆置于下有滚轮可自由旋转的圆盘上,盘边有动力驱动机,电缆可随转盘旋转放出,类似盘装电缆的敷设。转盘圈装敷设在电缆装载或放出时电缆不会被扭转,对绝缘不会产生不良影响。虽然敷设船上的装备复杂,但它适用于大长度超高压海底电缆的敷设。②舱内或甲板上的散装圈装电缆的敷设方法相同于筒装电缆,即必需用退扭架和倾斜滚轮通道架,以消除每圈电缆内的扭转应力。圈装敷设通常需用大长度的电缆专用敷设船。

(李裕芬)

hezha guodianya

**合闸过电压 (energization overvoltage)**

由于空载线路合闸前后电压状态不同导致暂态振荡所引起的过渡过程过电压。它是操作过电压的一种,是决定 330 kV 及以上的超高压电力系统操作冲击绝缘水平的依据。合闸过电压与合闸前线路上残留电压的大小、极性以及合闸时电源的相角有关。因为这些量均为随机变量,所以合闸过电压具有明显的随机性。若合闸前线路上有较高的残留电压,又恰好合闸于极性与线路残留电压相反的电源电压时,合闸过电压最大。三相重合闸过电压(尤其是不成功的三相重合闸过电压)要比单相重合闸或无故障正常合闸过电压高。空载长线路各点的合闸过电压幅值是不同的,对于无补偿的线路,线路末端的过电压要比线路首端的高。

限制合闸过电压的主要措施是:①断路器断口上并联百欧级的合闸电阻;②采用单相重合闸,使重合闸过电压接近无故障正常合闸过电压;③采用性能良好的阀式避雷器。

为了使合闸过渡过程降低至最弱程度,需研制受控合闸装置,控制断路器在两端电位差为零或接近零时完成合闸。

(方 瑜)

Holan KEMA dagonglu shiyanzhan

**荷兰 KEMA 大功率实验站 (KEMA high power laboratory)**

荷兰国营国际商业性试验研究机构,是世界上最大和最具权威性的实验站,已有 40 多年的历史。它有 4 个实验室,能进行开断与关合试验、近区故障试验、容性电流开合试验、感性电流开合试验、负荷电流开合试验、短时耐受电流试验、电力电弧试验、温升试验、机械寿命试验及机械可靠性试验等。

其 2 号实验室主要设备有:3000 r/min、50 Hz、

11 kV,单相短路功率为 400 MV·A,三相短路功率为 650 MV·A 的冲击同步发电机 2 台;3000 r/min、50 Hz、11 kV,单相短路功率为 750 MV·A,三相短路功率为 1250 MV·A 的冲击同步发电机 2 台;变压器 14 台,其中有 6 台容量为 250 MV·A 的单相变压器,电压为 11/(4×12.5) kV,6 台容量为 500 MV·A 的单相变压器,电压为 11/(2×25) kV,1 台容量为 360 MV·A 的三相变压器,电压为 11/150 kV 和 1 台大电流三相变压器,电压为 11 kV/315、550、630、1100 V,其最大输出电流为 120 kA;容量为 12 Mvar 和 25 Mvar 的电容器各 1 组。该实验室最大输出能力:短路关合电流为 80 kA,开断三相短路容量为 2500 MV·A (最高电压 173 kV),开断单相短路容量为 1500 MV·A (最高电压 300 kV)。短时耐受电流为 100 kA、3 s。开合功率因数为 0.7 的负荷电流容量为 60 MV·A。容性电流开合容量为 35 Mvar。

其 4 号实验室主要设备有:4 台冲击同步发电机,每台最大试验能力为 50 Hz,三相 2000 MV·A,单相 1250 MV·A;8 台变压器,其中有 6 台容量为 1800 MV·A 的单相变压器,电压为 14/(2×36) kV,2 台容量为 900 MV·A 的单相变压器,电压为 14/12 kV;另有容量为 36 Mvar 的电容器组。合成回路电压源装置等分为两组,各有容量为 1000 Mvar 的电容器组,800 kV 的直流充电单元,最大电抗器值为 128 mH,调频电容器组容量为 460 Mvar,瞬态恢复电压限幅电阻为 8~16000 Ω。并有先进的点火装置。该实验室最大直接试验能力(操作顺序为分—0.3 s—合分):单相,60 Hz、9~504 kV、2600~5300 MV·A,50 Hz、8~456 kV、2600~4900 MV·A,8 kV 时最大关合电流峰值为 1050 kA;三相,8~272 kV、3500~8000 MV·A。最大短时耐受电流为 250 kA、1 s。容性电流开合能力:直接试验为 36 Mvar,合成试验为 330 Mvar。端部短路的最大合成试验能力:电流为 120 kA,瞬态恢复电压为 970 kV (峰值),可进行 765 kV 断路器的整极合成试验。近区故障试验有三组可移式人工试验线路,其中第一、二组的试验电流分别可达 63 kA (单分)和 100 kA (重合闸),第三组用于合成试验。

参见彩图插页第 46 页 134 图。

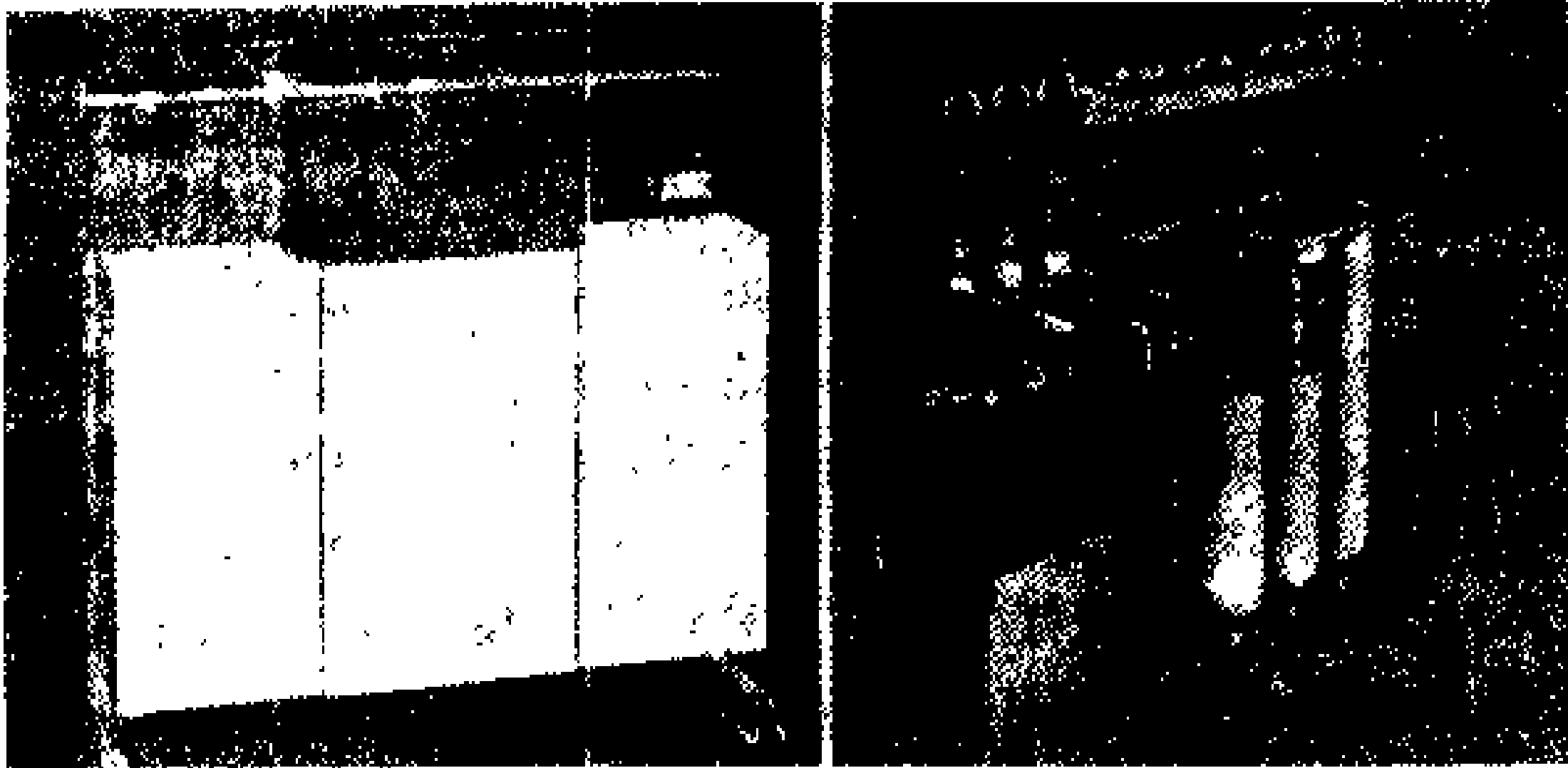
(顾竞鸿)

huguang jiedi guodianya

**弧光接地过电压 (arcing ground overvoltage)**

中性点不直接接地系统中单相间歇性弧光接地引起的过渡过程过电压。它是操作过电压的一种。当电力系统中发生单相弧光接地时,健全相电压升至线电压,它们的对地电容电流之和通过接地点而形成

回路,故接地电流 $I_g$ 不大。10 kV 和 35kV 线路的 $I_g$ 值分别约为 0.03A/km 和 0.1 A/km。如线路较短, $I_g$ 很小(数安以下),电弧能够立即自动熄灭。如 $I_g$ 值在数百安以上,则将形成稳定电弧。当 $I_g$ 值介于其间时,电弧会处于熄灭与重燃(重击穿)相互交替的不稳定状态,导致系统参数的急剧变动和电磁能的强烈振荡,并在健全相和故障相上产生较高幅值的过电压。



环网开关柜

工频熄弧和高频熄弧是两种理想化的描述间歇电弧发展的理论。根据工频熄弧理论,电弧在工频接地电流过零时熄灭,并在故障相恢复电压到达最大值时重燃,理论上健全相的最大过电压等于额定电压的 3.5 倍,实际上由于系统中的阻尼、泄漏和相间电容的降压作用,健全相过电压将不超过 3 倍额定电压,故障相的过电压则小于 2 倍额定电压。根据高频熄弧理论,电弧的熄灭在高频接地电流第一次过零时发生,理论上健全相和故障相上的过电压高达 7.5 倍和 6 倍额定电压,考虑到阻尼等的影响后降为 4 倍和 3.5 倍额定电压。

弧光接地过电压的实际发展过程极为复杂,工频和高频熄弧均有可能,实测到的最大弧光接地过电压不超过 3.5 倍,一般在 3 倍以下,故对正常绝缘的系统来说是不危险的。但在实际系统中难免存在着弱绝缘元件,故弧光接地过电压引起的闪络事故时有发生。

人为地增大相间电容,可以减小燃弧时过电压的振荡幅值,从而能降低弧光接地过电压。消弧线圈可以补偿接地电流,降低熄弧后恢复电压上升的速度,因而有利于接地电弧的熄灭,使得高幅值弧光接地过电压的出现概率大为减小。但是实验表明,当消弧线圈的脱谐度偏大时,仍有可能产生较高幅值的弧光接地过电压;如果调谐良好,则间歇性的弧光接地过电压极少发生。

(陈维贤)

huanwang kaiguangui

**环网开关柜** (ring mains unit) 能实现环网供电的一种高压开关柜。它是由工厂按固定组合要求组装而成,适用于短路容量为 500 MV·A 以下的城市配电网中,用来连接和保护 25~2000 kV·A 的变压器,也可作为配电设备之用,还可以作为箱式变电站高压侧电源设备。环网开关柜一般具有闭锁和带电显示装置。

按柜内绝缘介质不同分为空气型和六氟化硫型。按安装方式不同分为落地式、带升高座落地式、墙挂式和户外独立安装式。按柜体结构不同分为三回路单元、四回路单元和多回路单元。常用的功能单元有线路负荷开关,变压器保护(保护方式有熔断器负荷开关、组合式熔断器负荷开关和断路器),母线(电缆)进、出线(带或不带电压互感器),计量单元(包括电流和电压互感器和接地开关)等。三回路单元是环网开关柜的典型结构,即由二个线路负荷开关单元和一个变压器保护单元组成(见图)。世界上使用较多的有法国 MG 公司和德国 F&G 公司的产品。中国于 20 世纪 80 年代开始引进环网开关柜,并于 90 年代开始自行生产。

环网开关柜中的线路负荷开关通常采用空气、六氟化硫或真空型,已达到的基本参数为:额定电流 400~630 A,关合电流峰值 40~62.5 kA;频繁操作型负荷开关可在额定电流和功率因数为 0.7 时合分 100 次;能开断空载变压器和电缆电容电流。接地开关关合电流达 40~62.5 kA。变压器回路额定电流为 200 A。熔断器负荷开关或断路器的开断能力达 16~25 kA。断路器的继电保护装置是按低压侧主回路为熔丝保护或延时式低压跳闸来选择的。

六氟化硫型环网开关柜,除熔断器单独装在一个密封金属外壳内和操动机构位于箱壳板后面以外,其他所有功能回路和导电部分都装在一个充以 0.1MPa 表压的六氟化硫气体的金属密封箱内,结构紧凑,体积小,且不受外部环境的影响。

参见彩图插页第 22 页 68 图。

(顾竞鸿)

huanyang dianlan zhongduan

**环氧电缆终端** (epoxy resin cable terminal)

以环氧树脂复合物作为绝缘的电缆终端。只用在 1~10 kV 电力电缆线路。

环氧树脂复合物主要是用环氧树脂、石英粉、稀释

剂和固化剂在现场调配浇注而成，它具有优异的电气性能，有较高的机械强度，成型工艺简单，与电缆金属套和过渡金具（如出线梗）有较强的粘附力，因而能满足电缆终端的密封要求。

盛纳环氧树脂复合物的外壳，可以用尼龙、聚丙烯、已成型的环氧复合物壳体，也有的采用内壁涂有脱模剂的金属模具，待环氧树脂复合物浇入固化后脱模，降低环氧终端成本。

环氧终端用在油浸纸绝缘电缆上，其优点是结构轻巧，成本低廉，在一次环氧复合物调制后，可浇注制作较多的电缆终端，适合大批量安装。其缺点是复合物与油脂不粘合，密封的部件需要用溶剂揩去油污。此外，填充用的石英粉，配制前要预热排除潮气，以免在固化时化学反应的高温使绝缘中形成较多的气泡，对工艺要求严格。

自 20 世纪 50 年代开始，环氧电缆终端用于油浸纸绝缘电缆，一度在 1~10 kV 电缆线路上得到大量推广使用。但环氧复合物抗紫外线性能差，特别是在邻近化工地区，表面极易产生树枝状爬电痕迹，因此不能用在户外。其后 1~10 kV 的固体挤压聚合电缆得到发展，逐渐淘汰了油浸纸绝缘电缆，与此相配套的环氧终端也逐渐被淘汰。

（史传卿）

huanliu

**换流**（conversion）用可控的装置进行电能技术参数变换的物理过程。在其它行业中也称变流或变换。在高压直流输电领域中，换流主要指交直流电能的相互转换。

**换流方式** 主要有四种：交流变直流的整流、直流变交流的逆变、改变直流电能技术参数（电压或电流的大小和方向）的直流变换和改变交流电能技术参数（频率、幅值和相位）的交流变换。这四种方式分别简称为交-直变换、直-交变换、直-直变换和交-交变换，如图 1 所示。直流可视为零频率，则整流和逆变本质上也可属于广义的变频。直-直变换中主要有直流斩波调压。交-交变换中主要有交流变频和调压。

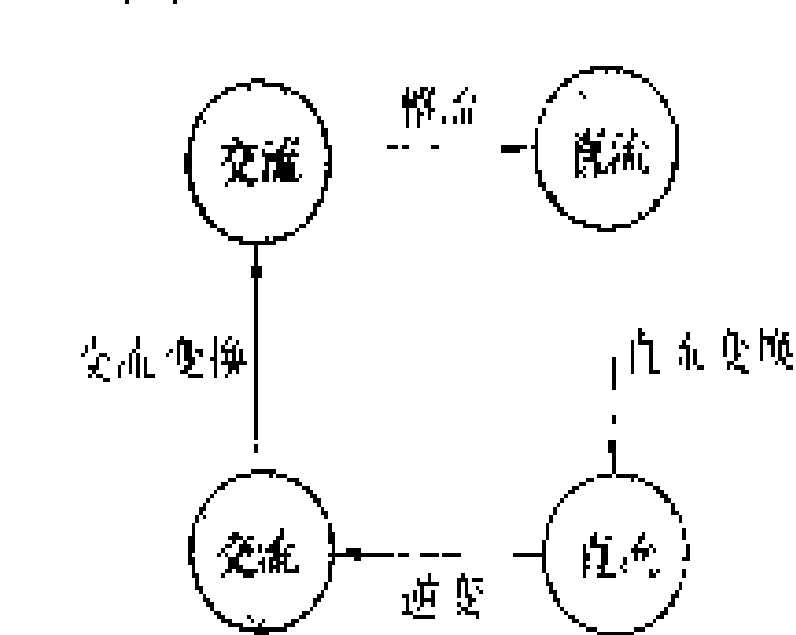


图 1 换流的四种基本方式

四种基本方式的组合还可以构成其它的换流方式。整流和逆变的组合可形成交-直-交的变频方式，是其中重要的一种。直流输电就是采用交-直-交的变频方式，以实现运行频率不同的交流电力系统间的连网和电能传输。

20 世纪 70 年代末以来，各种类型的可关断晶闸管和功率晶体管元件相继发明和投入生产，并有迅速的发展。用它们可以实现将工频变为另一频率的交-交变换，所得的电压波形如图 2 所示。一般地说，从工频变为低频的技术较简单，变为高、中频的则须用快速（关断）型元件，相应的技术也较复杂。逆变过程也可用快速自关断元件和脉冲宽度调制（PWM）方式来实现，波形示意如图 3 所示。采用自关断元件不但可减小换流所消耗的无功功率，甚至还可能产生部分无功功率以供其它设备的无功消耗，同时还可减小谐波滤波装置所需的容量。

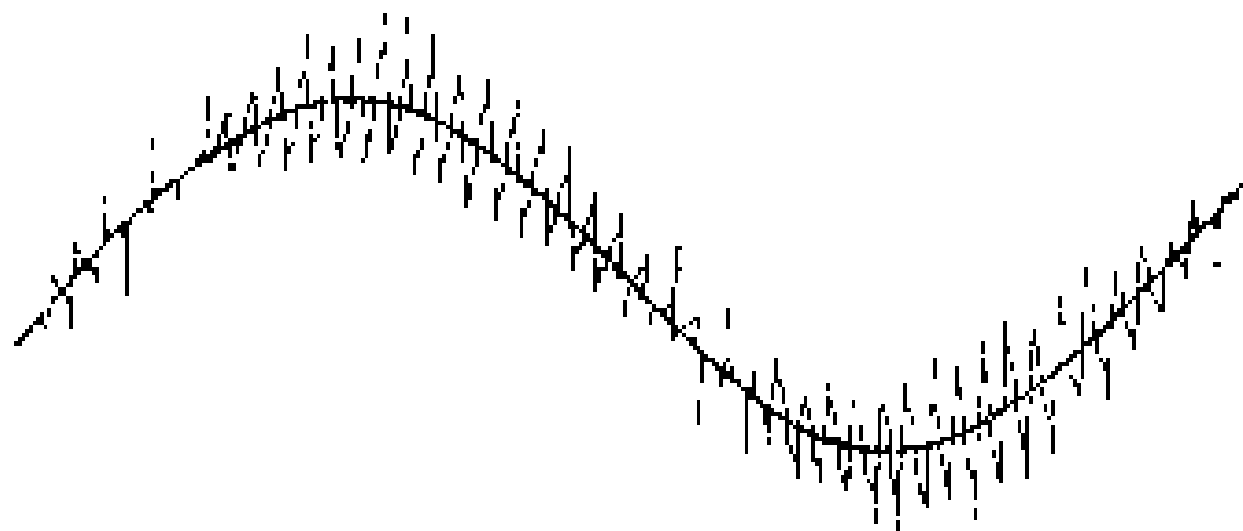


图 2 交-交变换所得到的波形

**应用** 换流技术在电力系统中的应用主要有：①高压直流输电；②静止型无功功率动态补偿装置；③大容量同步发电机的励磁；④电动机的调速；⑤抽水、压气、蓄电池或超导线圈储能-发电；⑥由可关断晶闸管构成无功补偿电源。换流技术在其他行业中也有广泛的用途，如：①电力机车和其它车辆的电力驱动和控制；②电解和电镀；③感应加热、焊接和冶炼；④空调、去湿、除尘和净化设备，气体压缩设备和制氧、制氮；⑤交、直流调压；⑥变频调压电源、恒频稳压电源和不停电电源（UPS）等。

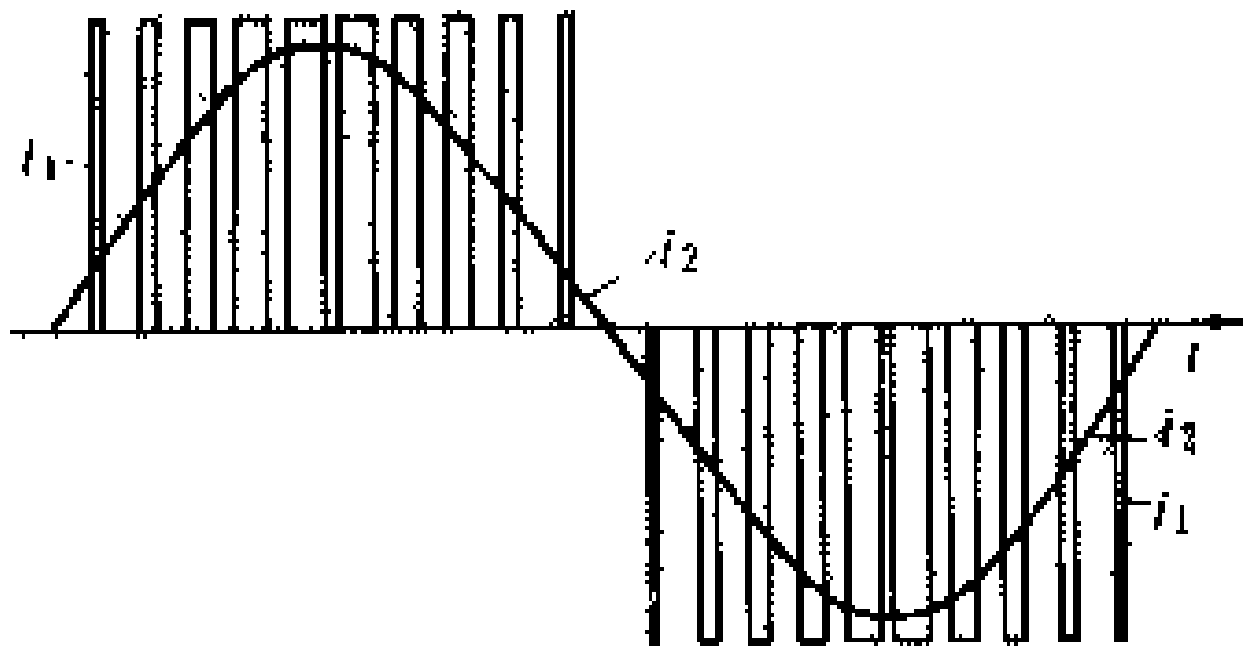


图 3 用 PWM 方式实现逆变的波形示意图

见换流电路、换流器、换流单元和换流阀。

**参考书目**

黄俊，半导体变流技术，北京：机械工业出版社，1983  
[新西兰]阿律莱加，高压直流输电，任震等译，重庆：重庆大学出版社，1987  
(Arrillage J. High Voltage Direct Current Transmission. IEE Publication, Power Engineering Series vol. 6, 1983)

（王锦诚）

### 换流变压器 (converter transformer)

接在换流桥与交流系统之间的电力变压器。换流变压器用来实现换流桥与交流母线的连接,并为换流桥提供一个中性点不接地的三相换相电压。换流变压器与换流桥是构成换流单元的主体。换流变压器在直流输电系统中的作用有:①传送电力;②把交流系统的电压变换到换流器所需的换相电压;③利用变压器绕组的不同接法,为十二脉动换流器提供两组幅值相等、相位相差 $30^\circ$ (基波电角度)的三相对称的换相电压;④将直流部分与交流系统相互绝缘隔离,以免交流系统中性点接地和直流部分中性点的接地造成短路故障;⑤换流变压器的漏抗可起到限制故障电流的作用;⑥对沿着交流线路侵入到换流站的冲击过电压波起缓冲抑制的作用。

**技术特点与要求** 由于换流变压器的运行与换流阀通断而造成的非线性密切相关,它在漏抗、绝缘、谐波、直流偏磁、有载调压和试验等方面与普通电力变压器有不同的特点和要求。

**漏抗** 以往由于晶闸管元件产品的额定电流和过负荷能力有限,为了限制阀臂短路和直流母线短路的故障电流,换流变压器的漏抗一般比普通电力变压器的大。随着晶闸管元件额定电流以及其过载能力的提高,换流变压器的漏抗可降低将近一半,从而降低其无功消耗及相应的能耗,同时,换流器的运行性能也有所改进。

为减小非特征谐波,换流变压器的三相漏抗平衡度要求比普通电力变压器的高,通常漏抗值公差不大于 $2\%$ 。现在有的制造厂采用了如图1所示的单相三绕组换流变压器的新结构,进一步减小了十二脉动换流单元中换流变压器的六个漏抗值的差别。

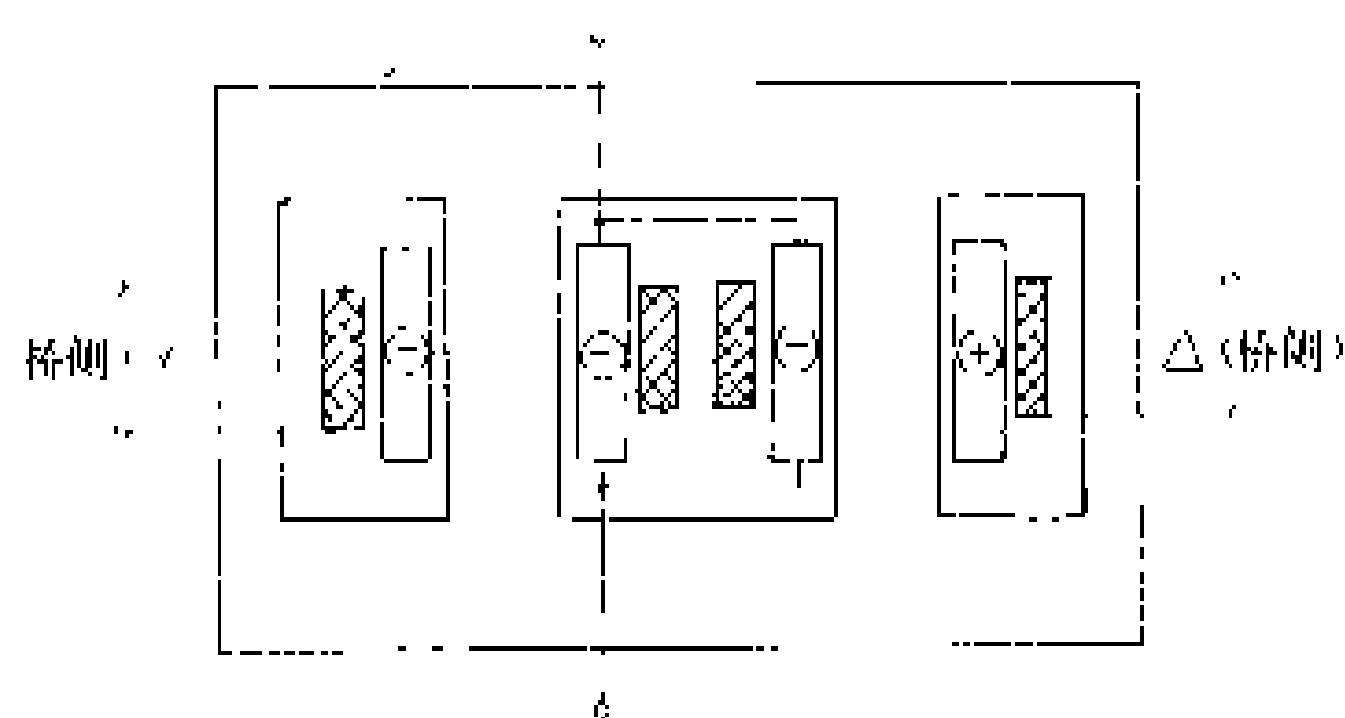


图1 单相三绕组换流变压器结构示意图

**绝缘** 换流变压器阀侧绕组和套管是在交流和直流电压一同作用之下工作的,如图2所示。在这种电压作用下,由于油、纸两种材质的电导系数与介电系数之比差别很大,油纸复合绝缘中直流场强按电导及其系数分布,交流场强则按电容及其介电系数分布。当直流电压极性迅速变化时,会使油绝缘受到很大的电应力。为了解决这个问题,正在研究一种电阻率较低的绝缘

纸(纤维素材料)。

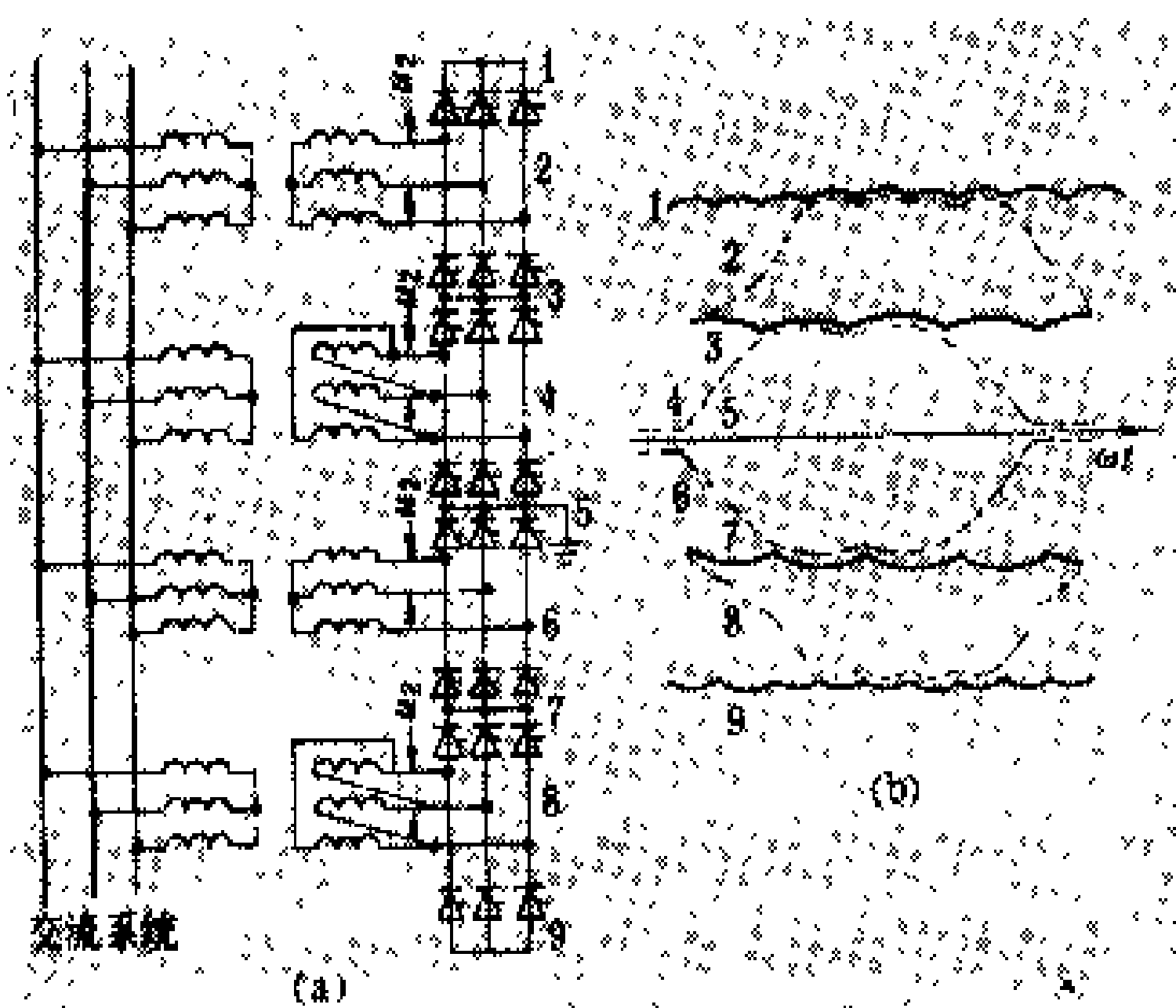


图2 双极、十二脉动换流变压器阀侧绕组对地电位  
(a) 接线; (b) 波形

越接近两极的阀侧绕组对地的直流电压越高,在设计时必然增大绕组端部和铁芯轭部的距离,使绕组端部的辐向漏磁和局部损耗增加,特别是谐波漏磁而引起的损耗则更大。

作为阀侧绕组外绝缘的套管,其爬电距离要考虑到直流电压的分量,为了避免雨天时在直流电压作用下,由于不均匀湿闪而造成的闪络故障,一般阀侧套管均伸入阀厅。气体绝缘金属封闭电器和全封闭导线也在研究试用之中。全封闭导线使设备连接紧凑,套管尺寸减小,对外界无线电干扰也大为降低。为了抗震,套管法兰盘处还装有振动阻尼装置。

**谐波** 换流变压器漏磁的谐波分量会使变压器的杂散损耗增大,有时可能使某些金属部件和油箱产生局部过热现象。在有较强漏磁通过的部件要用非磁性材料或采用磁屏蔽措施。谐波磁通所引起的磁致伸缩噪声处于听觉较为敏感的频带,必要时采取更有效的隔音措施。

**直流偏磁** 换流器触发时刻的间隔不等,换流变压器阀侧绕组电流中将存在着直流分量,使换流变压器产生直流偏磁现象。在铁芯的 $B-H$ 曲线上的运行工作点绕行轨迹偏离对称状态,部分进入一侧的饱和段,励磁电流分量出现一个半波的尖峰波形,使变压器的损耗、温升以及 $50\text{ Hz}$ 的噪声(正常时基波噪声频率为 $100\text{ Hz}$ )都有明显增加。因而换流变压器铁芯正常运行的磁通密度要设计略小一些。

**有载调压** 换流变压器应具有较多的有载调压分接开关,利用分接开关可使直流输电系统经常运行在最佳状态,换流器触发角运行在适当的范围内,以兼顾到运行的安全性和经济性。分接开关调压范围一般为 $\pm 15\%$ ,每档调节量为 $1\% \sim 2\%$ ,以达到分接开关调

节和换流桥触发控制联合工作,做到既无调节死区,又可避免频繁往返动作。

试验 换流变压器除了与普通电力变压器一样,需要进行例行试验、型式试验之外,还需进行直流电压试验、直流电压局部放电试验、直流电压极性反转试验等。(见变压器试验)

容量和型式的选择 换流变压器的额定容量可按下式进行初步选择,即

$$\left. \begin{aligned} S &= 1.047P_d \\ P_d &= 1.35U_d I_d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $S$  为换流变压器三相总容量;  $P_d$  为最大直流功率;  $I_d$  为额定直流电流;  $U_d$  为阀侧绕组线电压。容量选定之后,可用下式进行校核,即

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + \sum_{n \geq 2} S_{n,n}^2} \quad (2)$$

式中  $P$  为换流器的额定有功功率;  $Q$  为换流器的无功功率;  $\sum S_{n,n}^2$  为各次谐波视在功率的平方和,对于方波

$\sum S_{n,n}^2 = 0.315P^2$ 。对于采用双极十二脉动换流器的

换流站,换流变压器实际上有三种可供选择的型式:①采用 4 台三相双绕组变压器, Y, y 和 Y, d 接线的各 2 台,备用各一台,适用于中等容量的直流工程;②较大容量的工程,往往由于变压器运输条件的限制,而采用 6 台单相三绕组变压器,全部 Y, y, d 接线,备用只要一台,占地面积较大;③对于更大容量的换流站,采用 12 台单相双绕组变压器, Y, y 和 Y, d 接线的各 6 台,备用各一台,占地面积则更大。

参见彩图插页第 35 页 110 图。

(沈赞坝)

huanliu danyuan

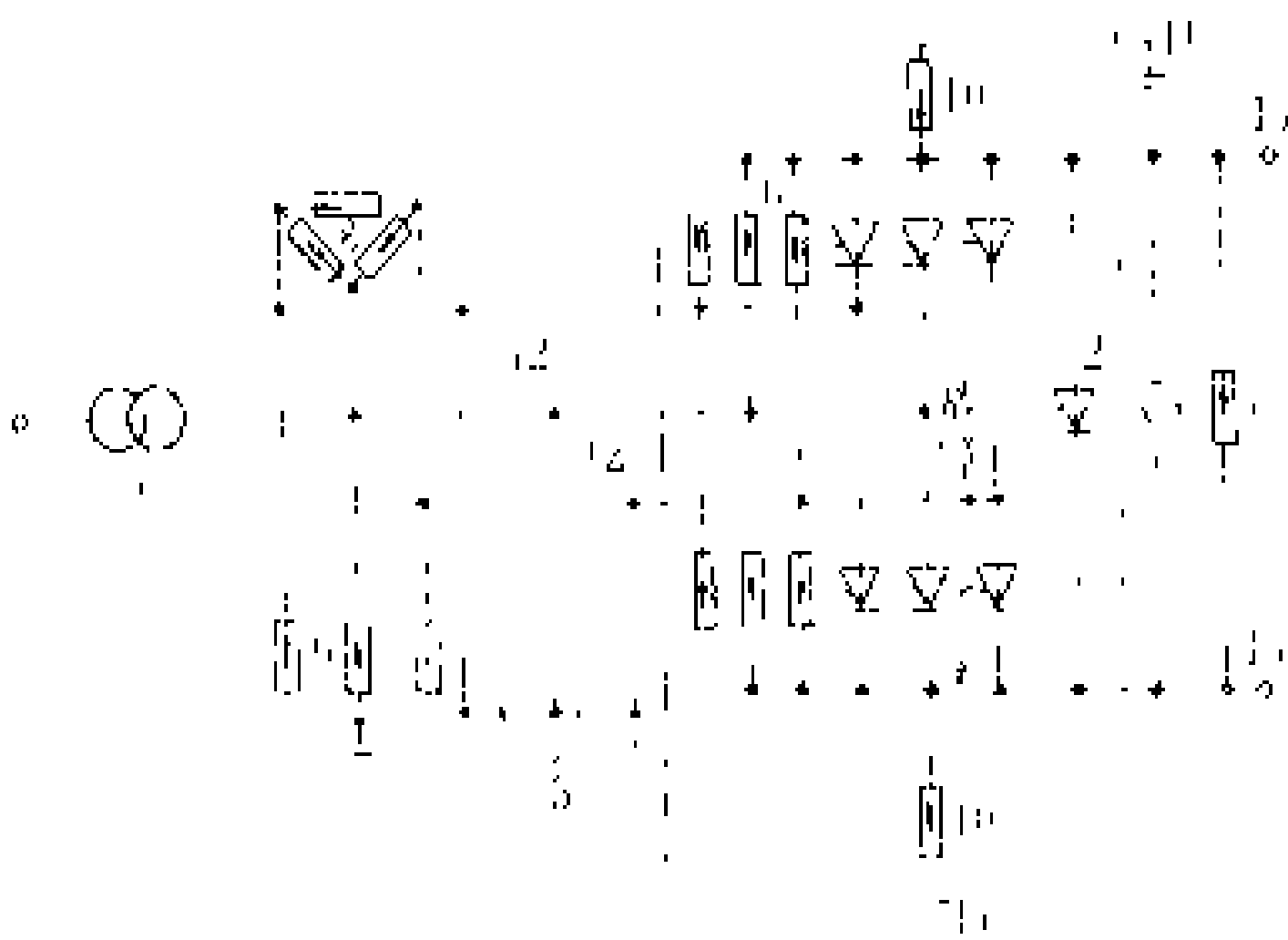
**换流单元** (convertor unit) 实现直流电和交流电相互转换所需的设备连接成的基本单元。由换流桥和与它配套的换流变压器、控制设备、保护和开关器件以及其它必要的辅助设备连接所构成,如图所示。

控制设备是指一个换流单元本身的控制、监测、保护设备及其构成的总体(见直流输电系统控制)。多个换流单元共用的控制、监测及保护设备,则不属于换流单元的设备,而属于极控制或换流站控制方面的设备。

图中的旁路阀是当换流桥臂采用汞弧阀时才设置,供处理汞弧阀逆弧故障之用。采用晶闸管阀的换流器没有发生过逆弧,无需设置旁路阀,必要时可在每个单桥的六个主桥阀所能构成的三组旁路对中选用一对,并使其同时导通,将换流桥的直流端短接,以代替旁路阀。三组旁路对是:一同接于 A 相的 1、4 两阀,

B 相的 3、6 两阀或 C 相的 5、2 两阀。直流端子间连接的旁路阀和旁路开关在换流单元要暂时退出工作时可触发开通或合闸,从而形成换流单元的直流旁路。

图中的过电流分流器也是用以处理换流器桥臂短路和直流端母线短路等重大故障的,但目前尚无成功的产品。



换流单元及其构成

- 1—换流桥; 2—旁路阀; 3—换流变压器; 4—旁路开关;  
5—过电流分流器; 6—阀避雷器; 7—桥避雷器; 8—相  
间避雷器; 9—相对地避雷器; 10—直流母线避雷器;  
11—站接地网; 12—桥交流端; 13—桥直流端

换流单元的交流侧端口并接到换流站的主交流母线的三相,有时是通过三绕组换流变压器实现与交流系统的连接。一个极的换流单元直流侧端口串接在直流系统的极和中性点之间。分析计算时常需将换流桥和换流变压器两个主要设备及其参数作为一个整体来考虑。

目前已建直流输电工程的换流单元大多采用十二脉动换流单元,它可减轻对环境的电磁污染,同时能降低滤波装置的投资。在十二脉动换流单元中需利用换流变压器绕组的 Y, y 和 Y, d 两种不同接法,为双桥换流器中每个换流桥分别提供一组三相交流换相电压,而这两组换相电压的相位差保持为 30°工频基波电角度,或用 Y, y, d 接法的三绕组换流变压器来提供这两组换相电压。如果双桥十二脉动换流单元中有一个桥因故退出运行,余下的一个桥仍旧运行时,则交、直流侧分别需要容量较大的 5、7 次和 17、19 次交流谐波滤波装置以及 6、18 次直流谐波滤波装置。因此,在大多数情况下,采取两个桥同时投切和旁路的运行操作方式。

从原理上说,可利用两个以上的换流桥串级组成多桥换流器,可得到脉动数更多而脉动峰—峰值进一步减小的直流电压。例如三桥十八脉动换流单元和四桥二十四脉动换流单元。但这两种接线方式,为得到相位分别相差 20°和 15°的换相电压,其换流变压器的接线较复杂,在实际工程中尚未采用。



见换流电路、换流器、换流阀、换流变压器。

参考书目

戴熙杰主编，直流输电基础，北京：水利电力出版社，1990

[瑞典] 乌尔曼著，直流输电，张金堂等译，北京：科学出版社，1983

(Uhlmann E. Power Transmission by Direct Current. New York: Heideberg, 1975)

(张春江 戴熙杰)

huanliu dianlu

**换流电路** (convertor circuit) 在直流输电中用以实现交流-直流和直流-交流变换的电路。高压直流输电中的换流电路由换流阀连接构成，各换流阀分别按一定规律变化，形成不同的通断组合状态(简称阀通断组态)，以实现交直流相互变换的换流。换流器与换流变压器组合成换流单元，有时也统称为换流器。换流变压器连接在换流站主交流母线和换流器之间，以电隔离、磁耦合的方式，实现交直流之间的联系和电力交换。换流站换流设备的一个极可以由一个或多个换流单元串级组成。

换流电路的形式很多，如：单相全波整流电路、单相桥式整流电路、三相半波整流电路、三相桥式整流电路、两组三相半波级联的整流电路、Y-Y 分相整流电路、六相星形整流电路、单相全波三相级联整流电路、两组三相桥式级联的十二脉动(也称脉波)整流电路等。直流输电所采用的换流电路主要有三相桥式六脉动整流电路(见图 1)和两组三相桥式串联的十二脉动整流电路(见图 2)。

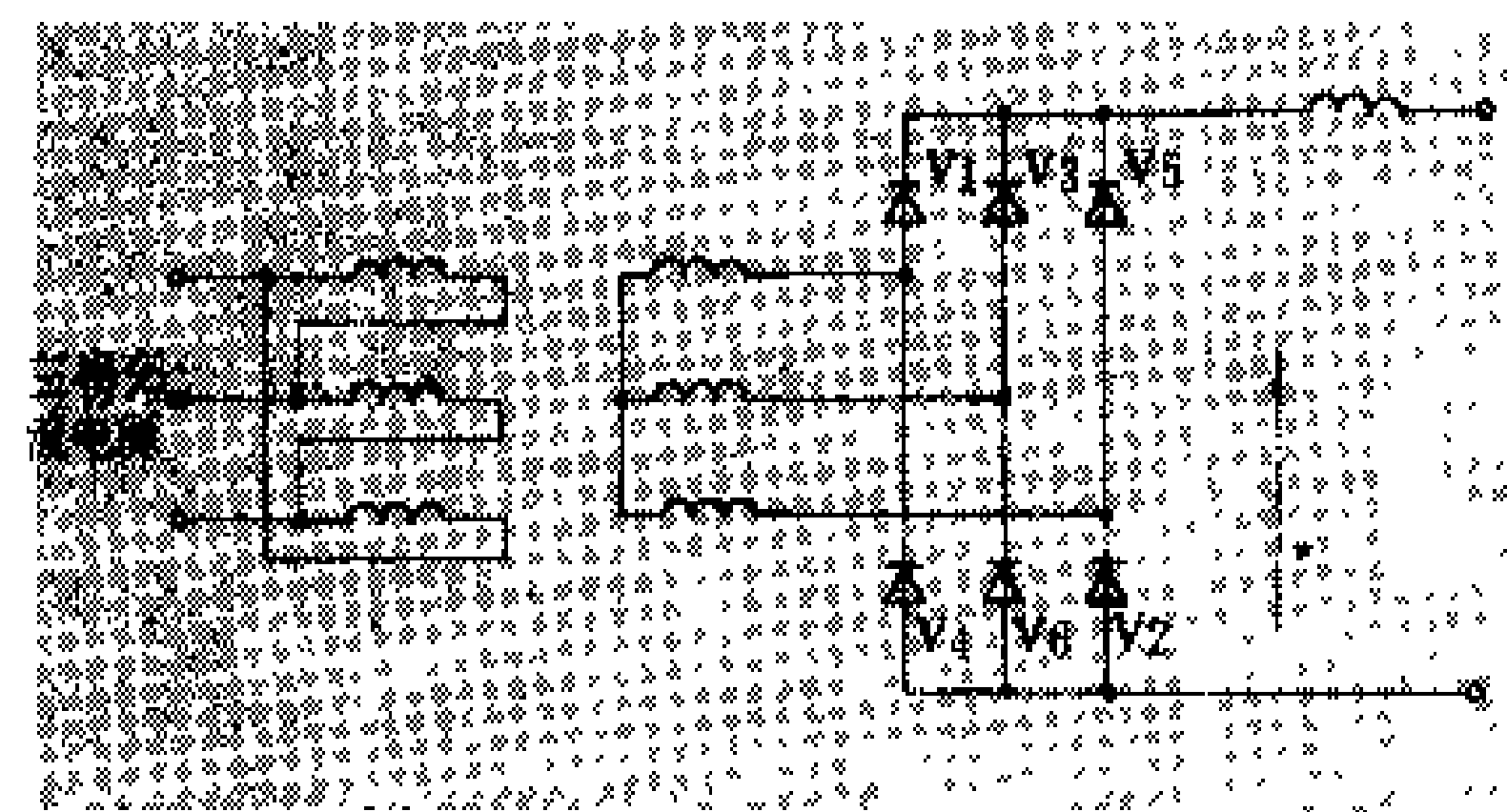


图 1 三相桥式整流电路 (单桥)

三相桥式整流电路与其它形式的电路相比，具有下列优点：①在直流电压相同的条件下，换流阀在断态下所受的电压峰值只有其它接线方式的一半，为直流电压的 1.047 倍；②在通过的功率为同一给定值时，换流变压器的容量小于或等于其它接线方式所需的容量；③换流变压器接线简单，换流桥侧不需要两个二次侧绕组或带中心抽头的绕组，这对变压器的绝缘是有利的；④换流阀的伏安容量较小；⑤直流电压纹波的峰

一峰值与直流平均电压的比值也较小。因此，当今直流输电换流器都采用这种三相桥式换流电路，即六脉动的单桥电路和十二脉动的双桥电路。一个三相桥式换流器也称换流桥，其中的桥臂也称为桥阀。

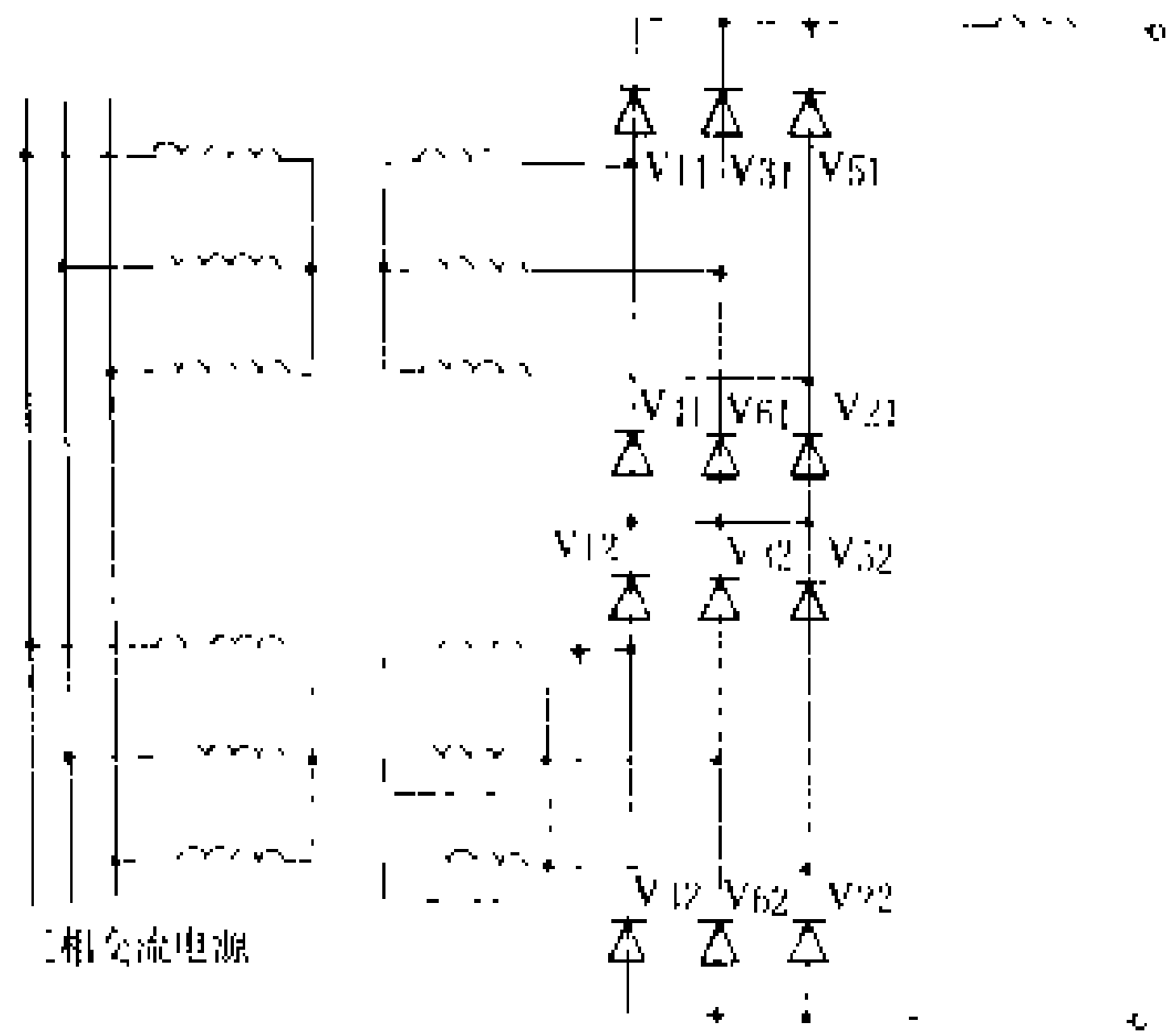


图 2 两个三相桥串联的十二脉动整流电路 (双桥)

参考书目

浙江大学发电教研室直流输电教研组，直流输电，新一版，北京：水利电力出版社，1985

黄俊，半导体变流技术，北京：机械工业出版社，1983

(王铭诚)

huanliu

**换流阀** (converter valve) 直流输电为实现换流所用的三相桥式换流器中作为基本单元设备的桥臂。它是电力电子元件串联组成的桥臂主电路及其合装在同一个箱体中的相应辅助部分的总称。直流输电所采用的换流阀有汞弧阀和晶闸管阀(也曾称可控硅阀)两种。由于电力电子技术的迅速发展，晶闸管阀比汞弧阀有明显的优点，目前在直流输电工程中，汞弧阀已被晶闸管阀所替代。今后晶闸管阀研究改进的主要课题是：高电压大功率晶闸管元件的研制(包括光控晶闸管和可关断晶闸管等新元件)，触发方式的更新，新的绝缘和冷却方式的开发，机械结构的变革和辅助电路的改进等。

**汞弧阀** 一种具有汞阴极并利用汞蒸汽电离后所形成的等离子体实现单向导电的真空离子器件。它在运行中，可用栅极对点燃相位角进行控制，借助于电力网提供的换相电压和电流，实现阀的开通与关断和换流器的换相。在一个阀箱体内设置两个以上的并联阳极者称为多阳极汞弧阀，例如双阳极汞弧阀、四阳极汞弧阀和六阳极汞弧阀。汞弧阀的最高运行参数曾达到 150 kV, 1800 A。图 1 为多阳极汞弧阀的构造示意图。

参见彩图插页第 33 页 105 图。

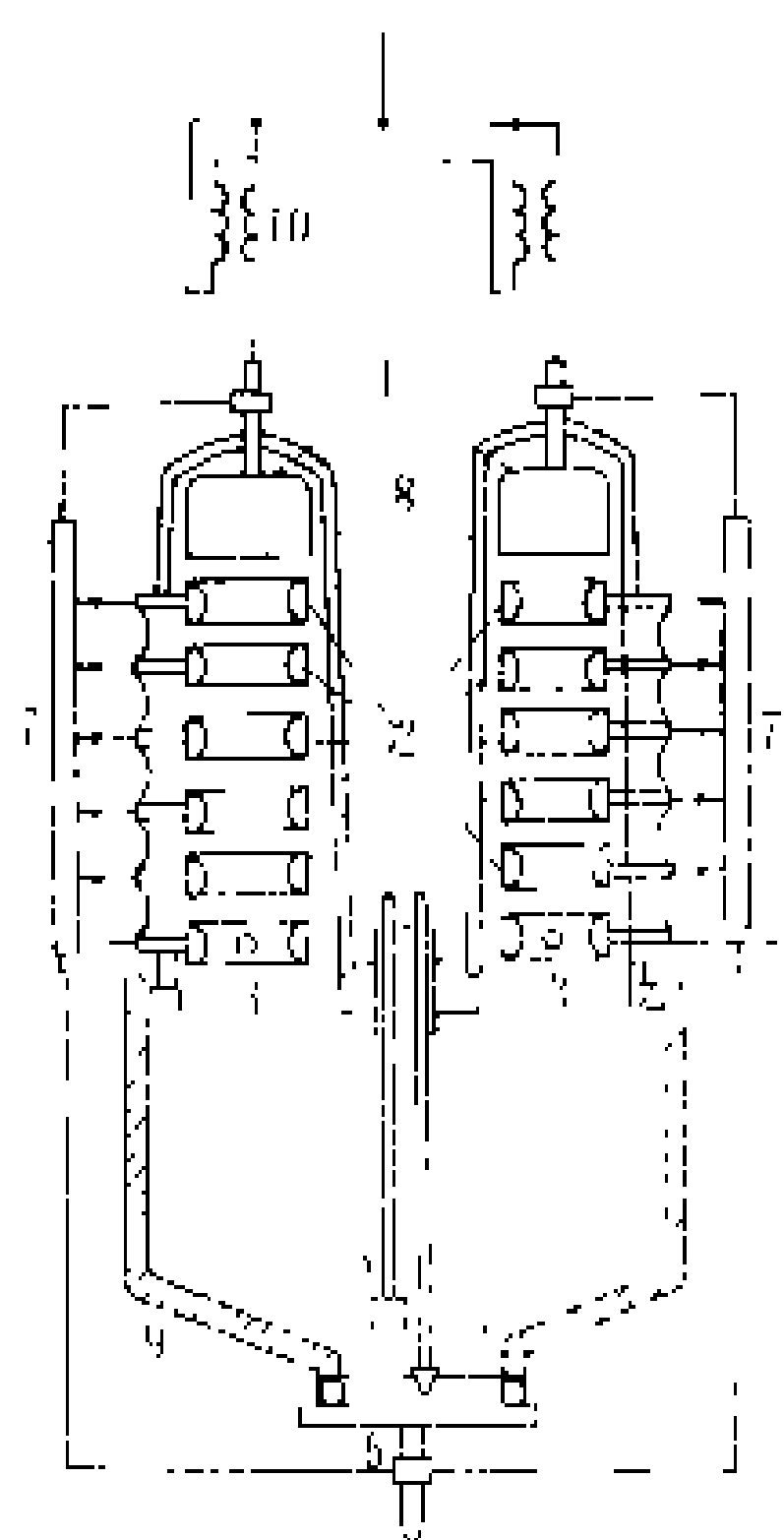


图 1 多阳极汞弧阀的构造示意图  
1—阳极；2—中间电极；3—控制栅极；4—引燃阳极；5—触发阳极；6—阴极；7—分压器；8—瓷绝缘套管；9—箱体；10—阳极均流器

汞弧阀在运行中会因其阳极上有阴极斑点形成而暂时失去反向阻断能力，发生逆弧故障。其故障本质相当于汞弧阀反向导通或桥臂短路。这种带有随机性的故障将导致有关换流单元工作中断，造成直流输电少送电的损失。1977 年后，新建工程已不再采用汞弧阀。

**晶闸管阀** 品种繁多的半导体阀中的一种，又称普通晶闸管。它是由许多规格相同的晶闸管元件串联组成。从 20 世纪 70 年代，瑞典在哥得兰岛工程中装设运行之后，逐渐取代了汞弧阀。晶闸管阀的特点是：①不会发生逆弧，可靠性高；②无需预热与复杂的温度控制和真空技术；③维修简便；④电子器件价格与常规电工器材比较有相对降低的趋势；⑤由于晶闸管阀是由众多的晶体晶流管元件串联而成的，阀的额定电压选择有很大的自由度。此外，晶闸管阀无需设置处理逆弧故障的旁通阀。因此，晶闸管阀在直流输电、静止型无功功率动态补偿装置、抽水蓄能电站的变频起动和变频运行，以及火力发电厂中大容量厂用电动机变频运行降耗等方而得到了广泛的应用。

近年来，可关断晶闸管（GTO）和光触发晶闸管均发展较快。换流阀采用可关断晶闸管，其关断时刻则不受换相电压的限制，可在任意时刻关断，因此可减少换流器消耗的无功功率，必要时还可向系统提供无功，从而简化了换流站的无功补偿。目前已能生产 2 kV、600 A 的可关断晶闸管元件，但对于直流输电来说，元件参数尚需进一步提高。光触发晶闸管换流阀在直流输电工程中已得到了应用。日本的新潟浓变频站和北海道一本州岛直流输电的扩建工程，均采用了光触发晶闸管元件，前者所采用的元件参数为 6000 V、2500 A，后者的为 6000 V、1200 A。采用光触发晶闸管元件，将使换流阀触发系统得到简化，同时也提高了换流阀的运行可靠性。参见彩图插页第 33 页 104 图。

**晶闸管阀的特性** 晶闸管阀是由许多特性相同的晶闸管元件串联组成的，它的特性主要取决于所采用

的晶闸管元件的特性。晶闸管的芯片直径现已达到 100 mm 以上，有效结面积达 60 cm<sup>2</sup> 以上，能承受的电压和电流分别达 6 kV 和 4 kA 以上。图 2 为晶闸管元件内部结构和工作原理示意图。

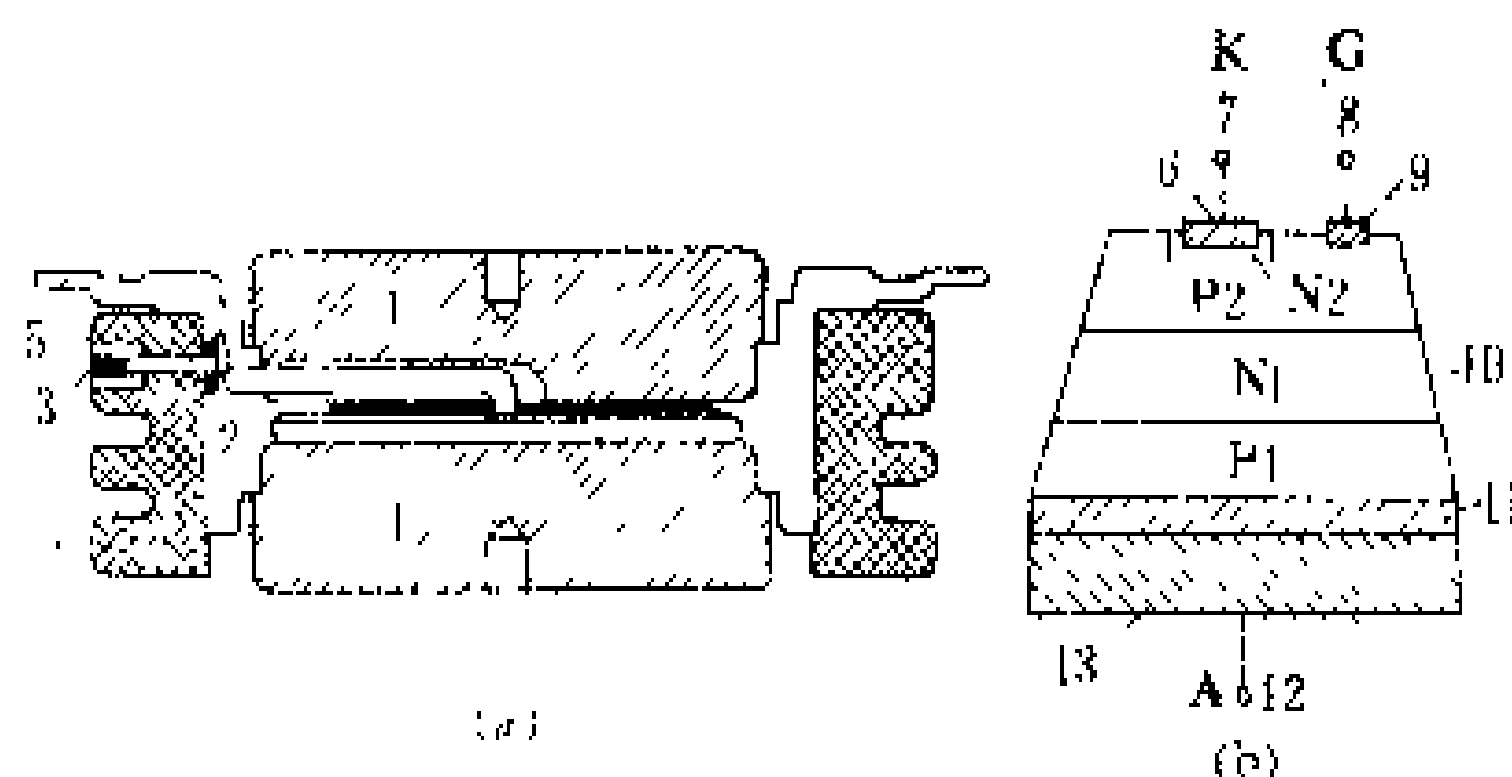


图 2 晶闸管元件内部结构和工作原理示意图

(a) 晶闸管元件剖面图；(b) 芯片内部结构

1—导电和传热用的铜块；2—硅晶片；3—控制极引线；4—瓷环；5—冷焊接点；6—金属片；7—阴极；8—控制极；9—金铂钎片；10—硅片；11—铝片；12—阳极；13—铜片

晶闸管元件阳极伏安特性 包括断态阳极漏电流特性、无触发阳极开通过程特性、触发开通过程特性、关断特性、反向伏安特性。其中阳极与控制极的极性均对阴极而言。

(1)断态阳极漏电流特性。当控制极未加正向电压时，不论阳极电压极性如何，元件仍处于阻断状态，阳极电流分别为很小的正向和反向漏电流。

(2)无触发阳极开通过程与特性。当阳极正向电压升高到某一数值  $U_{DSM}$  时，阳极电流骤增，而元件压降也突然减小到 0.5~1.5 V。在无控制极触发情况下，元件从断态转入通态。如果阳极电压多次超过某一数值  $U_{DSM}$  而且有大电流通过时，元件特性将恶化以至子元件损坏。

(3)触发开通过程与特性。如果控制极加上足够大的正向电压和电流，使元件可在阳极正向电压低于  $U_{DSM}$  情况下从断态转入通态。这是元件触发开通过程。控制极触发电流  $i_G$  越大，能开通的阳极电压可越低。元件经触发开通之后，即使撤去加在控制极的触发脉冲，元件仍将保持导通状态。这是晶闸管元件的主要特征。

(4)关断过程和特性。元件需关断时要在外电路作用下使阳极电流下降到零，从而开始关断。如果阳极有足够长的时间处于反向电压作用之下，则可保证元件阻断能力的恢复。

(5)反向阳极伏安特性。当反向电压增加时，原来很小的反向漏电流将增大。如果反向电压增至不重复峰值电压  $U_{RSM}$  时，阳极反向电流剧增，此时元件将可

能被击穿而损坏。如果阳极电压是负的,同时控制极加上正向电压,阳极反向漏电流及其特性的分散性都将增大,这是应该避免的。

**晶闸管元件控制极特性** 控制极正向电压和正向电流的容许值和必要值的范围及其之间的关系。控制极与阴极之间有一个 PN 结。在控制极加上正向电压的特性必然与二极管正向特性类似。

**晶闸管元件的动态特性** 主要包括断态电压临界上升率、通态电流临界上升率、开通时间、关断时间等。

(1) 断态电压临界上升率  $du/dt$ 。在额定结温和控制极开断等规定条件下,不会使元件从断态转变为通态的最大阳极电压上升率。其数量级一般为每微秒几百伏。

(2) 通态电流临界上升率  $di/dt$ 。在规定条件下,用控制极触发开通时,晶闸管元件能承受而不导致有害影响的最大阳极电流上升率。一般为每微秒数十到数百安。当元件触发开通时,控制极与阴极间结面的导通面积是从控制极引出部位逐渐扩展到整个结面,其过程约需几微秒到几十微秒。如果  $di/dt$  过大可能导致控制极引出部位附近结面电流密度过大,致使元件局部过热而损坏。

(3) 开通时间。延迟时间与上升时间之和,一般约为几十微秒。延迟时间是从控制极所加触发电压上升到终值的 10% 起到阳极正向电压下降到原有初始值的 90% 为止的时间。上升时间是阳极电压从初始值的 90% 下降到 10% 的时间,即相应的阳极电流上升的时间。

(4) 关断时间。元件在额定结温下,阳极电流在外电路所提供的换相电压和电流作用之下降低,到元件恢复阻断能力为止,这一过程称关断过程。关断过程所需的时间即关断时间。它是由反向恢复时间与控制极恢复时间两部分组成。反向恢复时间是阳极电流过零时,结面近区有大量剩余载流子在反向电压作用下形成的阳极反向电流达到最大值后逐渐减小到反向漏电流的时间。控制极恢复时间是由于剩余载流子继续复合和迁移使得元件阻断能力逐渐得到恢复所需的时间。

**发展趋势** 主要有:①高电压大功率元件的研制。由于电力电子器件制造技术的提高,目前晶闸管元件的额定值也在不断提高,芯片直径为 125~150 mm、额定电压为 6 kV 的元件已在研制之中。由于晶闸管元件电压提高,容量增大,元件串联个数可减少,因而整个换流阀的余度相对留得少,使得经济效益增加。此外,换流变压器漏抗可以降低到合理范围,以减小换流器的无功功率消耗及电能损耗,而且在元件的电流容量没有用足时,元件正向压降减小,相应有功功率和电能

损耗都将显著下降。②换流阀触发方式的更新。目前的直流输电工程的晶闸管阀触发信号是以电—光—电方式传递的。将触发信号经电—光变换之后,可利用光纤传递并分送到相应的每一个元件的控制极电路,再经光—电变换为电触发脉冲加于元件的控制极。由于光纤本身是绝缘性能很好的材料,作为光触发信号的信道,其绝缘费用省,同时光信号在传送过程中可避免受到电磁干扰。当今世界上生产电力电子换流器的各个厂家都在竞相开发光直接触发的晶闸管元件,以期达到制造光直接触发换流阀的目的(见换流阀触发系统)。③绝缘与冷却方式的开发。目前晶闸管阀的绝缘和冷却方式主要有:空气绝缘—水冷、油浸绝缘—油冷和 SF<sub>6</sub> 气体绝缘—氟里昂冷却等。水的热容量比空气大 5000 倍,水冷效果显著,能减小阀的尺寸。SF<sub>6</sub> 气体绝缘—氟里昂冷却的换流阀体积小,占地而积比空冷的小 50%,重量减轻 30%,适用于占地面积和空间受限制的地方,并便于与其它 GIS 设备配套。但目前价格较贵,使用经验不足。油浸绝缘—循环油冷方式的换流器阀体是放在充满绝缘油的铁箱中。它可以安装在屋外,节省建筑费用,而且抗震性能好。在铁箱的屏蔽之下,可以降低对外界的电磁干扰。但是维修不便,光纤两端如果浸在油中,不易做好与其它光器件的耦合。④机械结构方面的变革。为减小阀厅的空间,又便于阀之间的连接,直流输电用的晶闸管阀一般做成多重阀。当今的变革是采用悬摆型阀代替座装型阀。悬摆型阀从阀厅的梁上用弹簧系统悬挂下来,具有良好的耐震性能。阀在铅直方向采用可摆动的链接结构,在遇到地震时可在水平的任何方向自由摆动,从而隔开水平方向的地震应力。阀内部的导线、水管和光纤也做得能适应和跟随这种摆动。铅直方向的地震应力是靠悬挂的弹簧系统加以隔开。悬摆型阀的机械结构强度可降低,并从根本上消除了安装时可能造成的应力,费用也可节省,但阀厅建筑费用略有所增加。⑤阀辅助电路的改进(见晶闸管阀辅助电路)。

参考书目

熊开纬. 直流输电用可控硅换流器. 北京: 水利电力出版社, 1979  
 [日]关长隆等编. 可关断晶体管. 袁维慈等译. 北京: 中国铁道出版社, 1985

(孟庆东 张春江 赵礼生 戴熙杰)

huanliufa chufa xitong

**换流阀触发电系统** (firing system of convertor valve; ignition system of convertor valve) 从换流器控制装置的触发信号输出端到相应换流阀元件控制极之间实现触发信号的传输、分

送、变换和触发脉冲形成的整套系统。

**触发过程的技术要求** ①如果没有触发脉冲适时加于控制极,直流输电系统及其换流器就无法工作。因此触发系统的可靠性要高。②同一换流阀各元件触发开通的同时性要好,以保证阀中全部串联元件在允许的时差范围内基本同时开通,以免最后开通的元件遭受危险的过电压。如果可能,应适当增大触发电流实行强触发,以提高阀元件开通的同时性。③控制装置的触发信号输出端基本处于地电位,而阀中各元件的控制极对地电位不相同,电位差大的可达数百千伏,故要求触发系统的绝缘要能承受高电压。④要避免受干扰,以免触发脉冲丢失或误触发。⑤触发系统消耗的功率和电能要小。因为从地电位向处于高电位的控制极输送触发所需的电能或在阀内部就地取得电能均不容易。

**触发脉冲方式** 按加在控制极触发脉冲的波形分类,有尖脉冲、尖宽脉冲和连续尖脉冲三种。

**尖脉冲** 脉冲幅值约为最小触发电流的 10 倍以上,以达到强触发,提高元件开通的同时性。尖脉冲宽度约为数十微秒至一二百微秒。产生和传送尖脉冲的触发系统比较简单、可靠,并经济和低能耗。这种方式的缺点是:①当三相桥式换流器起动时,在发出当次触发脉冲的同时,要对前一个触发序号的桥阀添补一个附加触发脉冲,使两个换相组都有一个阀触发开通,从而换流器构成通路投入运行;②在直流小电流间断后不能恢复导通。如果添补附加触发脉冲成为经常性的做法,则称之为双尖脉冲方式。

**尖宽脉冲** 脉冲的波头部分为尖脉冲,整个脉冲宽度是从本阀触发开始到触发序号加 2 的阀臂触发为止,也就是到开始换相为止。在正常稳态下脉冲宽度约为工频周期的 1/3。其中宽脉冲的幅值为最小触发开通的控制极电流的 2~3 倍。其优点是阀电流间断后能再继续导通。缺点是电路较复杂,能耗也大。这种脉冲方式以往曾得到过广泛应用。

**连续尖脉冲** 综合了尖脉冲与尖宽脉冲的优点,把宽脉冲宽度作为开门区间,在此区间内只要晶闸管元件正向电压大于正常导通压降达到某值时,将有连续不断的尖脉冲(宽度 10~15 μs)触发这一元件。因此,当出现电流断续或换流器起动时,都能获得必需的附加补充触发脉冲。在晶闸管元件正常运行时,导通压降总是低于设定值,所以就不再需要另行补充触发脉冲。

**触发信号的传送方式** 控制装置的触发信号出口与晶闸管元件中控制极的不同电位间的信号传送有光传送和电磁传送两种方式。

**光传送方式** 将控制装置的触发信号,经过放大处理后驱动光源元件,把触发信号转换为光脉冲信号,

再经过光耦合器、光导纤维(简称光纤)将信号传送到安装在阀体构架上的光电转换器变换成电信号,在触发脉冲形成电路(见晶闸管阀辅助电路)中产生符合要求的触发脉冲。光源元件、光纤、光电转换器是光传送方式中的关键部件。图 1 所示为光传送方式示意图。

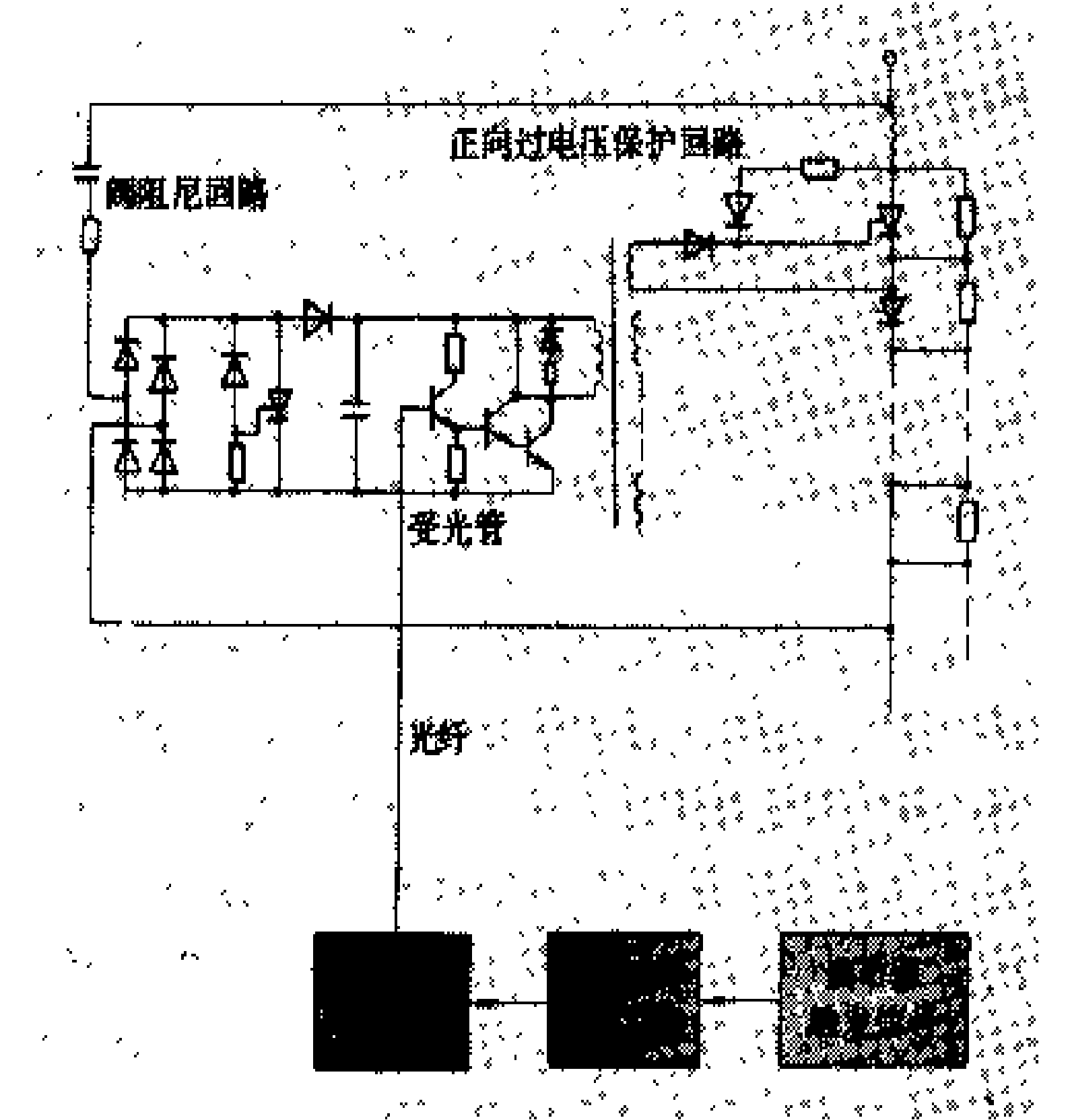


图 1 光传送方式示意图

(1) 光源元件。要求光功率足够大,响应时间快,光波波长在 8000~9000 Å 左右,且寿命长。常见的光源元件有大功率集中光源(如氙灯、铯灯)和分立式光源(发光二极管或激光管)二种。前者光源功率大,能同时供应几百根光纤信号,但使用光纤数多时,聚焦技术有一定困难。后者光源与光纤配套,耦合效果好,功耗小,寿命长,但成本较高。

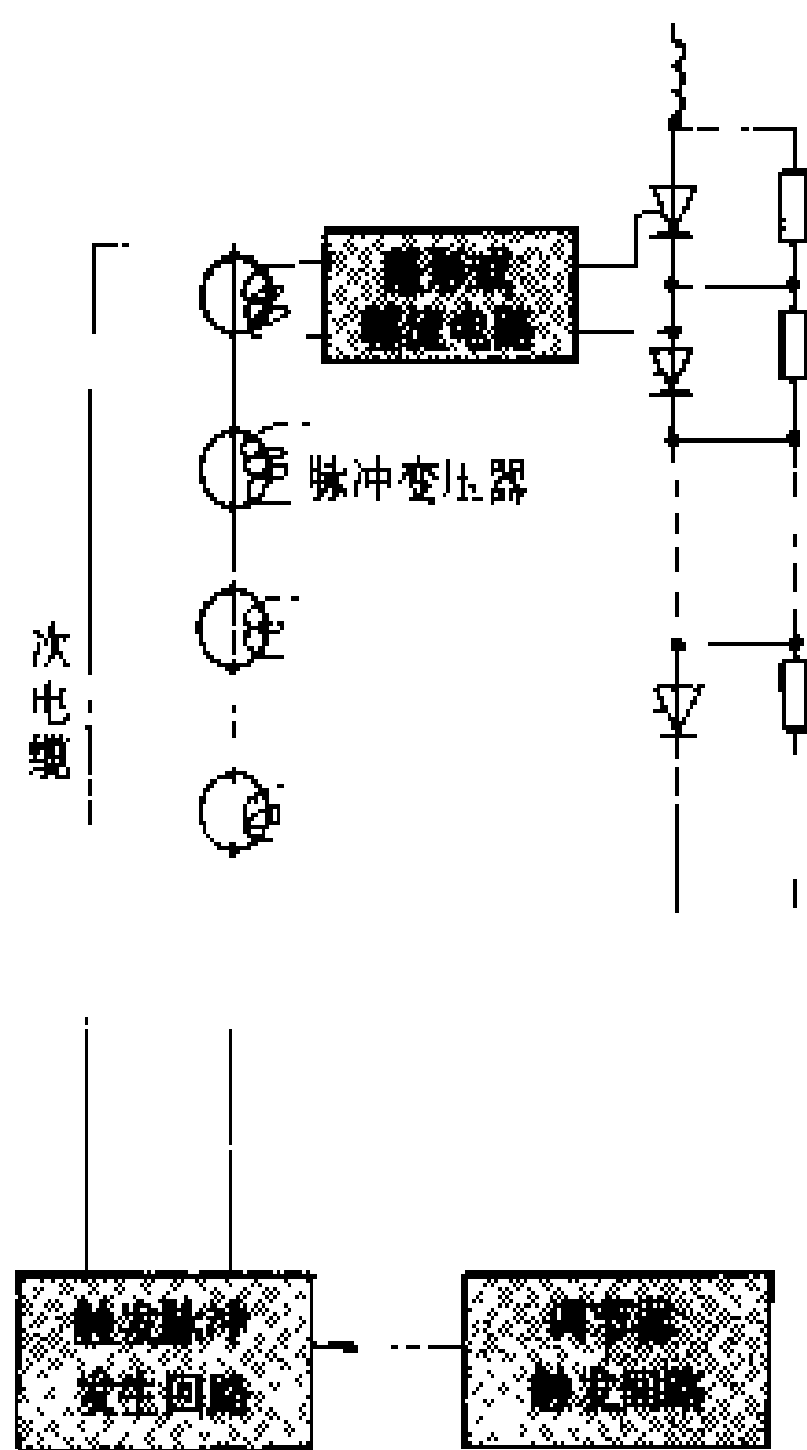


图 2 电磁传送方式示意图

(2) 光纤。要求具有一定机械强度,并且衰减要小。通常由高纯度石英或光学玻璃拉成圆柱形细丝,芯径约为 30~150 μm,由成束光纤加填充绳和外层塑料护套组成光缆,以提高机械强度。石英光纤比光学玻璃光纤的衰减要小。

(3) 光电转换器。要求灵敏度高,响应时间短。通常采用 PIN 管或雪崩光电二极管作为受光管,将光信号变为电信号。

**电磁传送方式** 将控制装置的触发信号,经过整形放大处理后,连接至作为脉冲变压器一次回路的电源,通过脉冲变压器的磁耦合,二次侧绕组与晶闸管元

件的控制极和阴极相连。这种脉冲变压器与电流互感器原理基本相同。在磁耦合中需要注意：①传输脉冲的电缆应尽可能短，否则将影响脉冲的前沿陡度和幅值；②必须合理设计脉冲变压器以减小脉冲变换的损耗；③尖脉冲和宽脉冲通常用二个脉冲变压器分别传送，这样能使脉冲变压器各自处于最佳条件下工作。图 2 所示为电磁传送方式示意图。

(林永生 赵礼生)

huanliuqi

**换流器** (converter) 换流站中用以实现交、直流电能相互转换的设备。在直流输电中，换流器一般由换流桥和换流变压器组成。改变换流阀的触发相位，它既可运行于整流状态，也可运行于逆变状态。将交流电变换成直流电的称为整流器，将直流电变换成交流电的称为逆变器。整流器与逆变器设备基本相同，统称为换流器。

直流输电换流器都采用一个或多个三相桥式换流电路串级构成，因而可用单桥换流器作为原理分析的基础。20 世纪 70 年代以来，换流阀的元件均采用晶闸管 (SCR)，它由控制系统触发开通，靠外电路的作用而关断。借助于控制系统的自动调节可使换流器具有需要的特性。(见换流阀触发系统)

由六个换流阀按三相桥式电路组成换流桥，其中阀 V1、V3、V5 共阴极，称为阴极换相组，又称阴极半桥；阀 V2、V4、V6 共阳极，称为阳极换相组，又称阳极半桥。阀文字符号 V 后面的编号是按周而复始的触发次序编排的，一般惯例是阀 V1 的阳极接到 a 相。

**整流原理** 为便于分析，需先作一些必要而合理的假设与定义，然后分析无相位控制(简称无相控)理想空载、有相控理想空载、实际空载、有载等不同条件下的情况。单桥整流器的原理接线如图 1 所示。

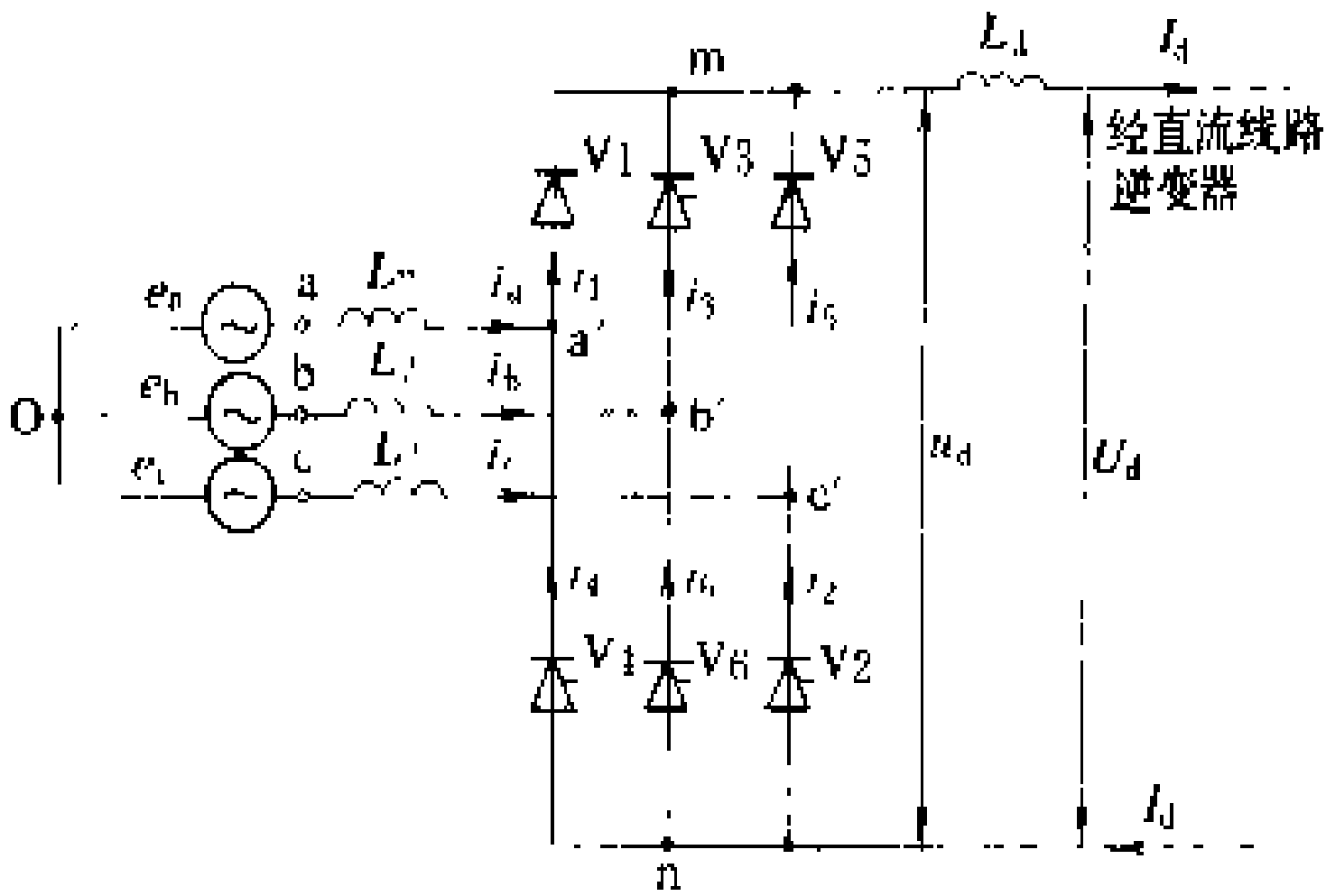


图 1 单桥整流器原理接线图

**定义和假定** 图 1 中  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为等值交流系统中对称正弦的工频基波相电动势，且每相等值电感相等。

图 2 是整流器的电压和电流波形图。对照图 1 与图 2 (a)，在相电动势  $e_a$  与  $e_c$  相等时刻，即在两曲线交叉的时刻，记为 C1。它也是线电压  $u_{ac}$  由负变正的过零点，称为换相电压  $u_{ac}$  过零点，或简称  $u_{ac}$  的电压零点。其余的电压零点 C2~C6 可类推。

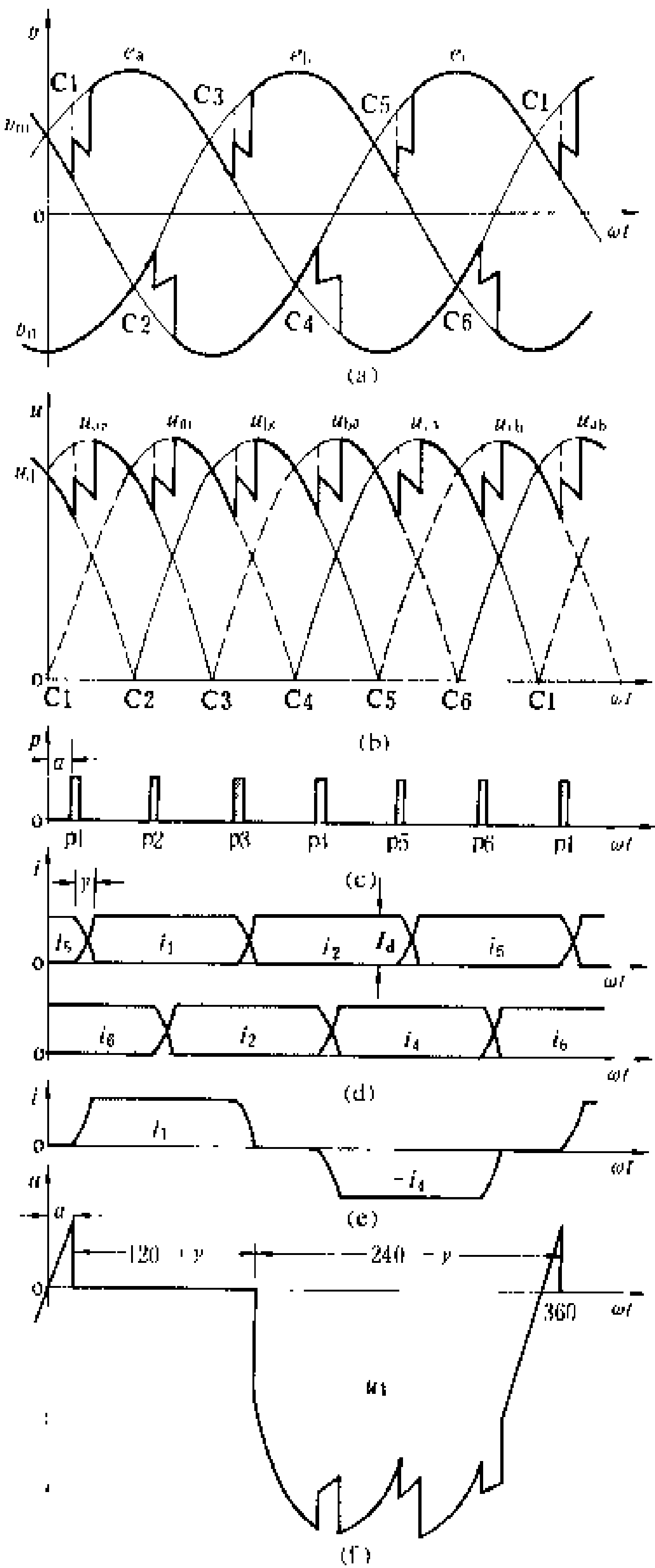


图 2 整流器的电压和电流波形

(a) 交流电动势和直流端母线 m、n 点对中性点的电位波形；(b) 直流电压  $u_d$  的波形；(c) 触发脉冲 p 的顺序和相位图；(d) 各阀电流波形；(e) 交流侧 a 相电流波形；(f) 阀 V1 上的电压波形

**无相控理想空载直流电压** 假定换流变压器漏抗和换流阀一次主回路中的电抗忽略不计(因其很小)，即换相电抗  $L_v=0$ ，换流阀均为二极管阀，即处于没有控制的情况。在 C1 时刻以后，从阀 V1 和 V6 处于导通状态开始分析。这时 a 点电位最高，b 点电位最低(如

无特别说明,电位是指该点对电源中性点的电位,以下同);a、b两点间的线电压 $u_{ab}$ 通过阀V6与V1正向加在共阴极母线m点和共阳极母线n点上,阀正向压降可以忽略不计。同时,假定平波电抗器的电感足够大,并可认为流经其中的直流电流波形是平直的,它流经电感 $L_r$ 不会产生压降。这时,换流器共阴极母线或直流输出端m的电位等于a和a'点的电位,共阳极母线或直流输出端n的电位等于b和b'点的电位,m、n两点间的电压为 $u_{ab}$ 。图1中其余各阀均处于阻断状态,直到C2时刻为止。在C2之后,a点电位仍最高,但c点电位变得比b点电位还低,于是阀V2进入导通状态而接替了阀V6,V6在反向电压作用下关断;n点电位与c和c'点电位相等,m、n间电压变为 $u_{ac}$ ,一直延续到电压过零点C3时刻为止。C3时刻到后,b点电位变得比a点电位还高,于是阀V1开始关断,阀V3接替V1而导通,m、n间电压变为 $u_{bc}$ 。按此方法分析,可以得到一个交流基波周期内各阀先后开通和关断的顺序。以后周而复始。从上述的分析可知:如果假定 $L_r=0$ ,在换流器工作过程中的任何时刻,总有两个阀处于导通状态,它们分别连接于三相交流系统中不同的两相和换流阀不同的换相组中;即V6V1、V1V2、V2V3、...、V5V6,例如阀V6和V1分别连接于b和a两相,它们又分别接在共阳极和共阴极换相组。每个阀在一个交流工频基波周期内导通 $120^\circ$ (电角度),阻断 $240^\circ$ 。在假定 $L_r=0$ 的情况下,阀的开通与关断都是瞬时完成的。不控制阀在运行中的开通相角的条件下,m点对于O点的电位是正值,n点总是负值。在n和m点之间,从一个C1时刻到下一周的C1之间的电压波形依次为1/6周期的 $u_{ab}$ 、 $u_{ac}$ 、 $u_{bc}$ 、 $u_{ba}$ 、 $u_{ca}$ 、 $u_{cb}$ 六个正弦曲线段相接而成,如图2(b)所示。这样,三相交流电动势 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 经整流为带有6个脉动的直流电压 $u_d$ ,所以单桥换流器又称为六脉动换流器。

从直流电压瞬时值 $u_d$ 取平均值得 $U_{d0}$ ,称为无开通、关断相位控制的理想空载直流电压平均值,即

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \quad (1)$$

式中 $E$ 为交流线电动势有效值。理想空载是指假定整流器直流端空载而且也不存在任何杂散电导和电容的理想情况。

有相控理想空载直流电压 如果换流桥由晶闸管阀组成,要使阀开通的条件是:①在外电路作用下,阀元件阳极对阴极的电位是正的;②必须在阀的控制极加上一个对元件阴极有足够高的正电位、并具有一定脉宽的触发脉冲(见换流阀触发系统)。由此可知:触发脉冲 $p_i$ ( $i$ 表示1~6中的一个序数,例如 $p_1$ )只有在相应的电压过零点 $G_i$ (例如 $C_1$ )到来之后才能使阀

$V_i$ (例如V1)开通。 $p_1$ 延迟于 $C_1$ 的电角度 $\alpha_1$ 称为延迟触发角,简称为触发角。通常六个阀的延迟触发角相同,并记为 $\alpha$ 。控制系统可按人为的规律进行阀触发相位的控制(简称相控),以得到所需要的换流器特性。

有相控时,在触发脉冲 $p_1$ 到来之前,原来导通着的阀V5仍继续导通,直到 $p_1$ 来到时,才被刚触发开通的阀V1所接替。这时整流器理想空载电压的平均值为

$$U'_{d0} = U_{d0} \cos \alpha \quad (2)$$

很明显, $U'_{d0} \leq U_{d0}$ 。 $u_d$ 的波形如图2(b)所示。整流器正常运行时,为了保证阀中一串元件开通的同时性,并留有可调节的余地,常取 $\alpha=5^\circ \sim 20^\circ$ 。

实际空载直流电压 在换流器直流端实际上难免存在杂散的电导和电容,由于电容储能的作用,换流器平均直流电压的实际值最大时可达到换相线电压的幅值( $\sqrt{2}E$ ),最小时将不会低于理想空载直流电压平均值( $U_{d0} \cos \alpha$ )。其具体数值除与触发角 $\alpha$ 有关之外,主要由杂散电导和电容的比值决定,也就是由电容充电和电导放电过程所决定。由于换流阀的非线性、阀辅助电路、直流平波电抗器与滤波设备以及直流线路参数的参与,空载时的现象更加复杂,甚至导致振荡性的瞬时过电压。

有载整流器直流侧外特性 当换流站直流侧有载时,由于平波电抗器的电感足够大,而且有的工程还装设有直流滤波器,直流电流将是一个波形近似平直、平均值为 $I_d$ 的直流电流。

实际上 $L_r > 0$ ,因此实际情况与上述的 $L_r=0$ 的情况有差别。当触发脉冲 $p_1$ 到来时,由于有电感 $L_r$ ,所触发开通的阀V1电流 $i_1$ 不可能立刻上升到直流电流 $I_d$ ,行将退出导通的阀V5电流 $i_5$ 也不能立即从 $I_d$ 下降到零,都必须经历同样长的一段时间,这段时间所对应的电角度 $\gamma$ 称为换相角,这一段时间内所经历的过程称为换相过程,见图2(d)。换相的两个阀属于同一个换相组的半桥。在换相过程中,参与换相的两个阀V1和V5都处于导通状态,于是m点电位既不是 $e_a$ ,也不是 $e_c$ ,由于假定网络参数是对称平衡的,a、c两相的 $L_r$ 各降落了一半的电压,因而它是 $e_a$ 和 $e_c$ 的平均值,也可用 $e_a - \Delta e$ 或 $e_c + \Delta e$ 表示,见图2(a)。其中 $-\Delta e$ 是阀V1中电流上升时在 $L_r$ 上感应的反电动势, $+\Delta e$ 为V5中电流下降在 $L_r$ 上感应的正电动势。在触发脉冲 $p_i$ 使相应的阀 $V_i$ 开通时都有一个换相过程。在电源电压经外电路的作用下,阀 $V(i-2)$ 开始关断退出导通,于是整流器实际直流电压波形如图2(b)中的粗曲线所示。换流器直流电压平均值为

$$U_d = U_{d0} - \frac{3}{\pi} \omega L_r I_d = U_{d0} - d_r I_d \quad (3)$$

式中  $\omega$  是工频交流基波的角频率； $\frac{3}{\pi} \omega L_r$  用  $d_r$  表示，它有时不太确切地被称为换相等值电阻，但它不消耗有功功率。原理上， $d_r$  是一个单位的直流电流在换相过程中所引起交流侧电压的下降，而相应地表现为整流所得直流电压也有所下降，故称为比换相压降。由此可见，有载时的直流电压平均值比空载理想值减小了  $3\omega L_r I_d / \pi$ 。因此按式 (3) 可以画出一个等值电路。式 (3) 所表达的是整流器直流电压平均值  $U_d$  和直流电流平均值  $I_d$  的关系，所以称为整流器的伏安特性或外特性。(见换相、换流器运行特性)

图 3 (a) 为整流器实际的阀电压典型波形。它与图 2 (f) 的理想波形的不同在于：实际波形中还有了阀开通、关断引起的过冲和振荡。同时还可以利用阀电压图形来简明地定义各种时间或相位间隔，如图 3 所示。

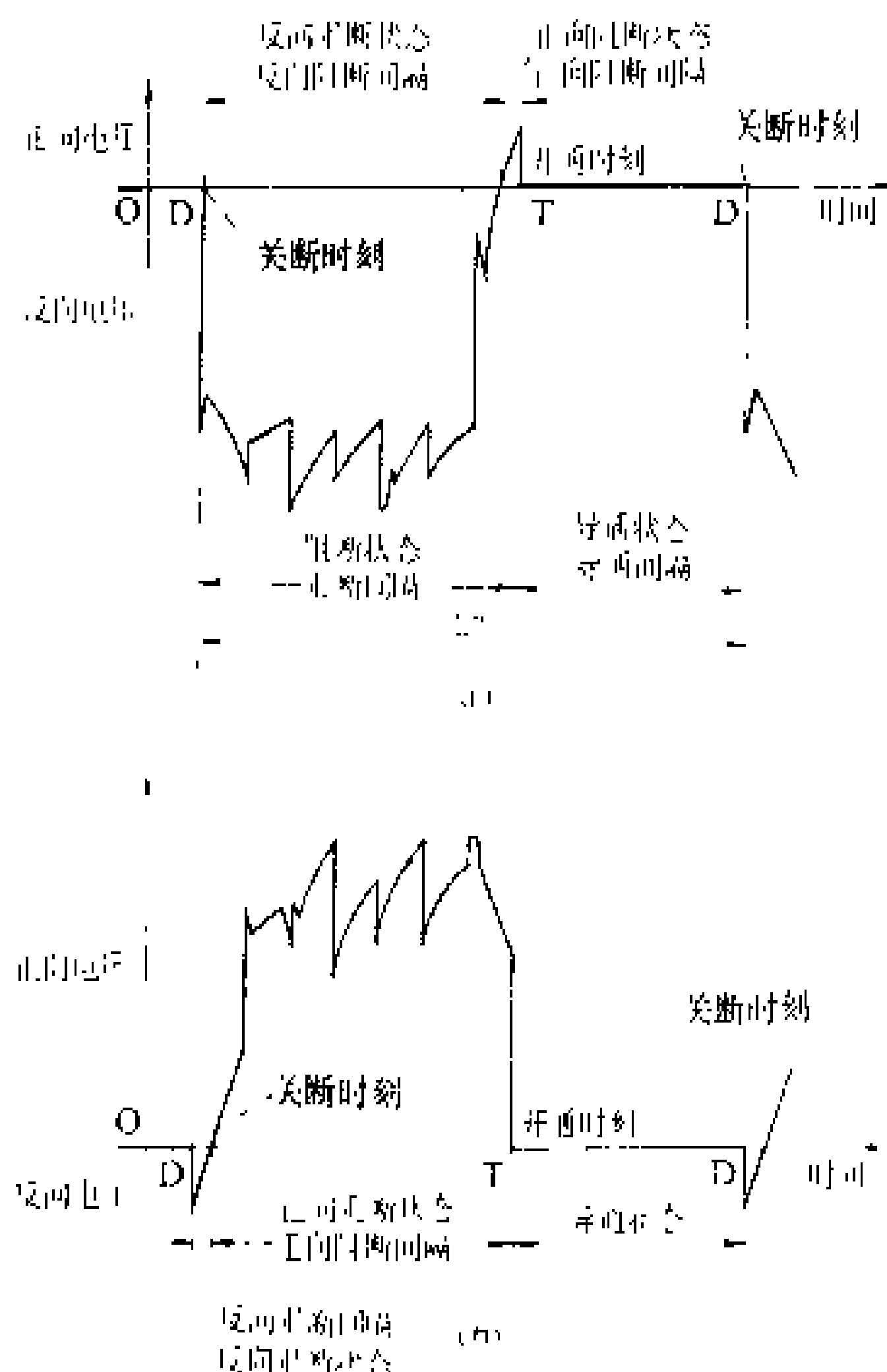


图 3 阀电压典型波形

(a) 整流运行方式；(b) 逆变运行方式

**逆变原理** 逆变器的任务是将整流器输出并经过直流输电线路送来的直流电转变为交流电，然后送入受端的交流电力系统。图 4 为单桥逆变器原理接线图。

将图 4 与图 1 对比可见，逆变器和整流器的原理接线相同，因此换流器既可作为整流器，又可作为逆变器，它们只是运行状态不同而已。沿直流主回路循环一圈，可知逆变器阀的可导通方向必然要与整流器一致，

才能保证其中直流电流的流通。

当图 4 中的换流器作为整流器运行时，它的共阴极点  $m'$  相当于前述整流器的  $m$  点，其电位应为正值，共阳极点  $n'$  电位应为负值。作为逆变器运行时， $m'$  和  $n'$  点极性的正负与  $m$  和  $n$  点正好相反。

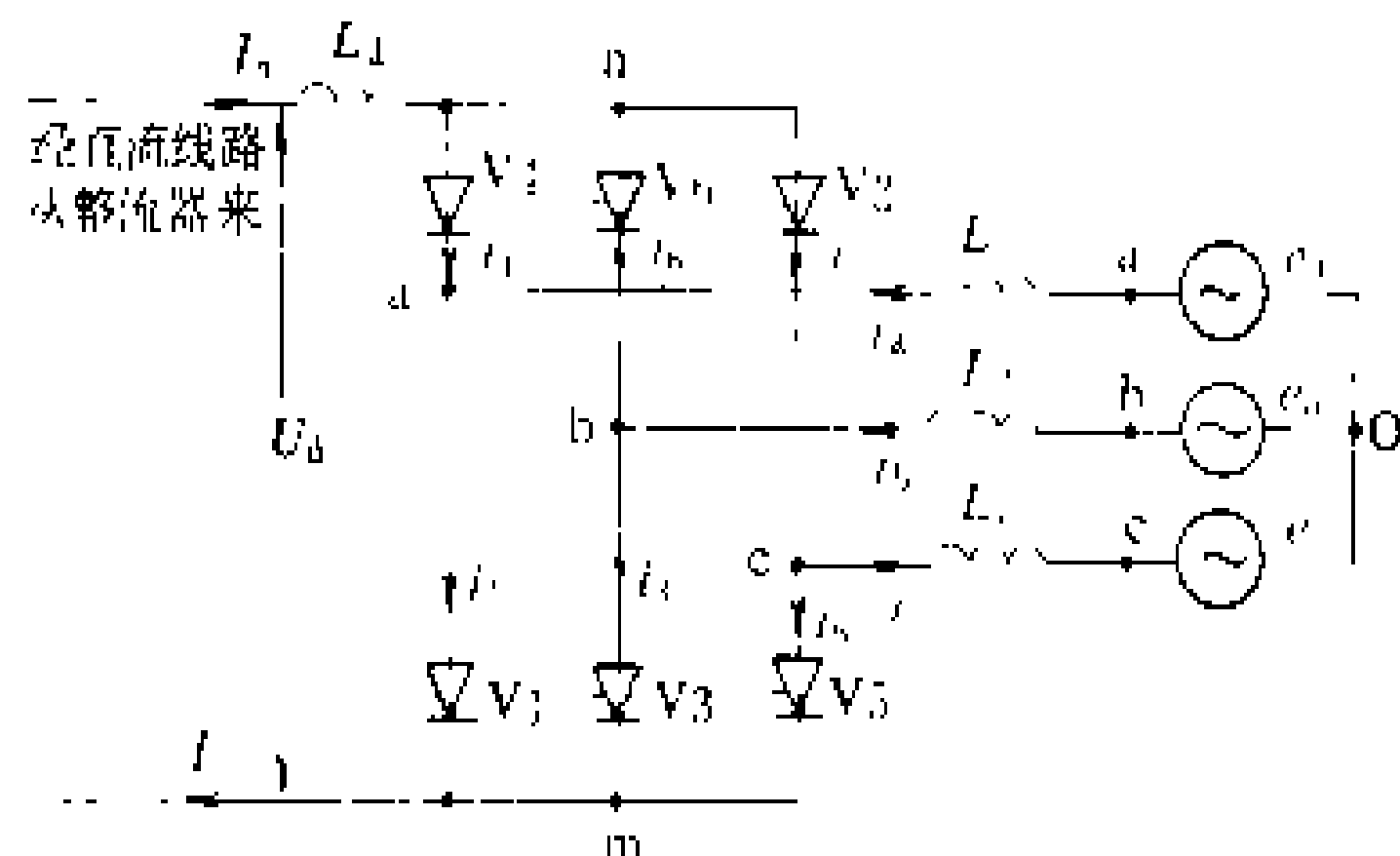


图 4 单桥逆变器原理接线图

由式 (2) 可知，如果触发角  $\alpha$  加大到  $90^\circ$ ，则  $U_{d0} = U_{d0} \cos 90^\circ = 0$ 。如果  $\alpha$  继续增大而超过  $90^\circ$ ，则  $U_{d0}$  出现负值。这时共阴极点  $m'$  电位将为负值， $n'$  点电位将为正值。于是换流器就可能由整流运行方式变为逆变运行方式。这时式 (3) 可写为

$$\begin{aligned} U_d &= U_{d0} \cos \alpha - d_r I_d \\ &= -U_{d0} \cos (180^\circ - \alpha) - d_r I_d \\ &= -(U_{d0} \cos \beta + d_r I_d) \end{aligned} \quad (4)$$

$U_d$  就是逆变器直流端电压的平均值。式中超前触发角  $\beta = 180^\circ - \alpha$ ，当  $\alpha > 90^\circ$ ，即  $\beta < 90^\circ$  时，式中括号内为正值，括号外的负号表明  $U_d$  与整流器直流端电压的极性相反。同样根据式 (4) 也可画出逆变器的等值电路图及伏安特性。(见换流器运行特性)

当整流器直流电压高于逆变器的反向直流电压时，或者说沿着两个换流器可导通方向计算所得式 (3) 和式 (4) 的代数和为正时，直流电流  $I_d$  通过直流线路与逆变器，将电能送到受端的交流系统。

由图 2 (a) 可知：正常情况下，从 C1 到 C4 的间隔为  $180^\circ$ ，定义  $\beta = 180^\circ - \alpha$ ，表明  $\beta$  是 p1 到 C4 之间的相位差，或者说  $\beta$  是 p1 超前 C4 的相角。因此， $\beta$  称为换流器的超前触发角，常用以表达逆变器的运行状态。

由于受端交流系统等值电感  $L_r$  的存在，逆变器运行时也有一个换相过程，其历时用换相角  $\gamma$  表示。从触发时刻，例如 p1，阀 V1 开通时刻算起，到原来导通现正退出导通的阀，相应例如阀 V5 中的电流  $i_5$  降到零的时刻，即 V5 的开始关断时刻为止，记为  $\gamma_{n1}$ 。当各换相角都相等时可记为  $\gamma$ 。为保证逆变器安全运行，要求从阀 V5 关断到电压过零点 C4 间的超前关断角  $\delta = \beta - \gamma$ ， $\delta$  也简称关断角。 $\delta$  应有足够大的正值。阀 V5 开始关断后即处于反向电压作用之下，并持续足够长

的时间以恢复其阻断能力,保证换相成功。否则,到C4时 $i_5$ 尚未降到零或阀V5尚未完全恢复阻断能力,从C4时刻起阀V5又受到正向电压的作用,阀电流 $i_5$ 重新增大或阀V5不经触发又重新开通,阀V1向V5倒换相而后关断,V5仍继续导通,这就是换相失败。在此过程中,阀的开通和关断失去正常顺序,出现电流的故障性增大(见换流器故障)。为防止换相失败,关断余裕角 $\delta_0$ 取为 $15^\circ\sim 20^\circ$ 。(见换相)

综上所述:直流输电逆变器能正常运行的工作条件为:①逆变器和整流器的桥阀在直流回路中的可导通方向要相一致;②逆变器直流侧应有直流电源,整流器的直流电压要比逆变器的反电压大,因而能向逆变器注入电流;③逆变器交流侧受端交流系统以提供足够大的换相电压和电流,以实现换相;④ $\delta_0$ 取值为 $15^\circ\sim 20^\circ$ 左右,以保证安全换相。

逆变器与整流器工作情况不同之处还有:阀电流、换流器网侧交流电流和阀电压波形都相当于整流器的波形翻转 $180^\circ$ 。由图3(a)与(b)的对比即可一目了然。逆变器阀电压波形在一个工频周期内有一大部分时间处于正向阻断状态,而整流器大部分时间则处于反向阻断状态。

**多桥换流器** 单桥换流器的工作原理是双桥和多桥换流器工作原理的基础。将两个换流桥串联连接,即直流端串联,交流端通过换流变压器网侧绕组并联。同时换流变压器阀侧绕组一个为星形接线,而另一个为三角形接线,使串联的两个换流桥得到相位相差 $30^\circ$ 的换相电压,从而构成12脉动双桥换流器。它的每一个换流桥的工作原理与单桥换流器的基本相同。双桥换流器的直流电压是两个单桥换流器直流电压之和,它在一个工频周期中有12个脉动数,所以又称为十二脉动换流器。它的交流电流谐波和直流电压谐波比6脉动的小(见直流输电系统谐波)。为了提高设备的可用率和便于分期投资,可将三个或更多的换流桥串接即成为多桥换流器(见换流单元),其原理可从单、双桥换流器推而广之。实际工程中,串接的换流桥数不超过四个,四桥换流器一般是由两个十二脉动换流器串接而成。

参考书目

浙江大学发电教研室直流输电科研组,直流输电,新一版,北京:水利电力出版社,1985  
[苏]波谢,直流输电结线及运行方式,华北电力学院直流输电研究室译,北京:水利电力出版社,1979  
(周 波)

huanliuqi bísuò hé jiěsuǒ

换流器闭锁和解锁 (convertor blocking and

deblocking) 直流输电系统起停过程中的重要操作步骤,也指闭锁或解锁操作之后换流器及其触发系统所处的状态。换流器闭锁是控制系统停止向换流器施加触发脉冲。在换流器闭锁后,直流系统将保持于带电而又停运的状态。换流器解锁是向换流器施加触发脉冲,以进行触发相位控制,使换流器可以运行于整流或逆变状态。只有在换流器解锁后,直流系统才能起动。

**闭锁** 有直接闭锁和移相闭锁两种方式。

**直接闭锁** 当控制系统收到闭锁换流器指令时,立即停止向换流器施加触发脉冲。以6脉动整流器而言,闭锁之前已触发开通的换流阀,在闭锁时仍有两个导通着,并将延续导通到闭锁之后。闭锁时处于阻断状态的其余4个阀因无触发脉冲则处于阻断状态。正在继续导通的两个阀将把相应的换相电压加到直流回路。在这工频交流电压作用下使带有工频分量的直流电流边波动边下降到零,一旦该电流降到零,导通的两个阀则关断。由于直流回路储存有能量,一般要经几个交流工频周期或更长的时间,直流电流才能下降到零。这两个阀会继续导通多久才会关断,主要取决于直流线路和平波电抗器等有设备的参数以及闭锁时直流电流的大小。当阀在直流电流瞬时值过零开始关断时,将发生振荡过电压。特别在故障停运时,由于直流故障电流大,直流系统储能较多,可能产生的过电压也较大。这种简单的闭锁方式近年来已被移相闭锁所代替。

**移相闭锁** 当控制系统收到闭锁换流器指令时,立即将触发脉冲快速移相到 $110^\circ\sim 150^\circ$ ,使整流器变成逆变器。一般在 $20\sim 40\text{ ms}$ 内直流电流可降到零,电流到零后延时 $20\text{ ms}$ 闭锁控制系统发出的触发脉冲。这种方式可将直流回路的储能在很短时间内倒送往交流系统,缩短直流电流降到零的时间,且可避免直流电流降到零值开始关断时的过电压,是直流输电换流器经常采用的闭锁方式,特别是用于故障停运效果更好。

**解锁** 换流器的解锁过程一般是先解锁逆变器,做好正常起动和换相的准备,再解锁整流器,使直流输电系统正常起动和正常换流。如果在逆变器未解锁时先解锁整流器,有可能造成全电压起动的不正确起动方式。(见直流输电系统起停)

(赵晚君)

huanliuqi chufa xiangwei kongzhi

换流器触发相位控制 (convertor firing phase control) 用改变换流阀触发开通的相位,实现直流输电系统及其换流装置运行状态调节的一种控制方法。有等触发角控制和等相位间隔控制两种控制方式。



等触发角控制 又称按相控制或分相控制。早期的直流输电曾采用过这种控制方式。其特点是：换流器的每一换流阀都有各自分开的触发相位控制电路，直接以每个阀上各自的交流电压为参考，即以它的瞬时值变正的过零点为相位基准，以决定该阀触发时刻的相位，保持各阀的延迟触发角相等。

在交流系统三相电压对称时，按相控制的各阀相继触发脉冲间的相位差在稳态运行时是相等的。实际上，加在换流器上的三相电压难免有一定程度的不对称，此时各阀的触发角彼此相等，而各阀相继触发脉冲间的相位间隔也就彼此不等。触发脉冲相位间隔不相等，将在换流器的交流侧和直流侧产生非特征谐波电流和电压（见直流输电系统谐波）。为滤除特征谐波而装设的交流滤波器（见换流站交流滤波装置）和直流滤波器（见换流站直流滤波装置）对低次非特征谐波的滤除作用很小，未被滤除的低次非特征谐波电流将流入交流系统，将进一步导致交流电压发生畸变和过零点相位的相对移动，从而造成触发脉冲间隔更加不相等，产生更大的非特征谐波，可能形成恶性循环。特别是在交流系统谐波阻抗较大时，有可能产生增幅的谐波振荡，使换流器的调节器工作不正常，直流电流和电压发生摇摆，甚至造成直流输电系统工作的不稳定。此外，触发脉冲间隔不等，还会使换流变压器产生直流偏磁，导致换流变压器损耗和噪声增大。可能发生谐波不稳定是按相控制方式的主要缺点。

等相位间隔控制 又称等间隔控制或等距离脉冲控制，它与按相控制的不同在于它不以保证各阀触发角相等为目标，而是保证相继各触发脉冲间的等相位间隔。每个换流器只装一套相位控制电路，发出等相位间隔的触发脉冲信号序列，并按一定顺序，依次分送到相应阀的触发脉冲发生器去触发该阀。如果交流系统三相电压对称，在等相位间隔控制作用下，各阀的触发角也是相等的。如果交流系统三相电压不对称，等间隔触发控制能有效地抑制非特征谐波可能形成的恶性循环，以防止发生谐波不稳定现象。这时各阀的触发角不相等。为使各阀的触发角平均值与从调节器来的控制信号有确定的对应关系，必须对它进行校正与同步。由于触发脉冲间隔相等，产生的非特征谐波很有限，克服了按相控制的主要缺点，成为当前普遍采用的触发相位控制方式。这种方式的缺点是，当交流系统发生不对称故障时，各阀的触发角之间相差较大，有时会造成调节器工作困难，但可予以克服。

控制装置的硬件可以用模拟型电路、数字型电路或两者的混合电路来实现。与整个控制系统一样，触发相位控制的发展方向也是控制功能多样化，多微处理机化，多重化和智能化。

### 参考书目

林永生等，高压直流输电，上海：上海科学技术出版社，1982

（周 波）

huanliuqi gongkuangtu

**换流器工况图** (converter charts) 表明换流器稳态运行时各个变量和参数间关系的通用曲线族图。它是根据理想条件下换流器稳态运行特性方程式绘制而成的，能全面、直观地表明换流器直流电压、直流电流、触发角、换相角、关断角以及交流侧电流、有功功率、无功功率等各变量间的关系及其变化规律，可供换流器设计、运行时进行工况简捷计算和运行特性分析之用。

直流输电系统三相桥式全控换流器的工况图常用的有两种。一种以直流电压  $U_d$  和直流电流  $I_d$  为变量，其他各量作参数的  $U_d - I_d$  直角坐标系工况图；另一种则以交流侧有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  为变量，其他各量作参数的  $P - Q$  直角坐标系工况图。为了使工况图有通用性，各有量纲的参数、变量均用标么值表示。

**$U_d - I_d$  直角坐标系工况图** 以直流电压标么值  $U_{d*}$  为纵坐标，直流电流标么值  $I_{d*}$  为横坐标，以其他各量为参数的曲线族图。图 1 为直流输电用六脉动换流器的工况图。图 1 (a) 包括等触发角  $\alpha$ 、等换相角  $\gamma$  和等关断角  $\delta$  三组曲线族；图 1 (b) 包括等有功功率  $P$ 、等无功功率  $Q$ 、等视在功率  $S$  和等功率因数  $\cos \varphi$  四组曲线族。图 1 中第一象限对应于整流状态，第四象限对应于逆变状态。各量的参考方向如图 2 所示。

各基准值分别取为：直流电压  $U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U$ ，

直流电流  $I_{d0} = \frac{U}{\sqrt{2} X_r}$ ，功率基准值  $S_0 = U_{d0} I_{d0} =$

$\sqrt{3} U I_B$ ，交流电流基准  $I_B = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{d0}$ 。各式中  $U$  为归算到换流变压器阀侧的换相电压，亦即交流电源电压的有效值， $X_r$  为归算到阀侧的换相电抗值。与通常的标么制不同，这里各基准值将随变量  $U$  的变化而改变。

等触发角  $\alpha$  曲线族 根据换流器外特性方程

$$U_{d*} = \cos \alpha - 0.5 I_{d*} \quad (\gamma \leq 60^\circ)$$

$$U_{d*} = \sqrt{3} \cos(\alpha - 30^\circ) - 1.5 I_{d*} \quad (\gamma > 60^\circ)$$

以  $\alpha$  为参数绘制的曲线族如图 1 (a) 所示。它表明触发角  $\alpha$  等于某给定值时  $U_{d*}$  和  $I_{d*}$  的关系。换流器正常运行时开通触发角与触发角  $\alpha$  相等，但当  $\gamma \geq 60^\circ$  且触发角小于  $30^\circ$  时，两者则不相等。

等关断角  $\delta$  曲线族 用关断角  $\delta$  ( $\delta = \beta - \gamma$ ) 表示

的外特性方程为

$$U_{d*} = -\cos\delta + 0.5I_{d*} \quad (\gamma \leq 60^\circ)$$

$$U_{d*} = -\sqrt{3}\cos(\delta + 30^\circ) + 1.5I_{d*} \quad (\gamma > 60^\circ)$$

根据上两式,以 $\delta$ 作参数绘制的曲线族,称为等关断角 $\delta$ 曲线,如图1(a)所示。它显示了 $\delta$ 等于给定值时 $U_{d*}$ 与 $I_{d*}$ 的关系。

逆变器运行于 $\gamma \leq 60^\circ$ 情况下,关断角 $\delta$ 与实际关

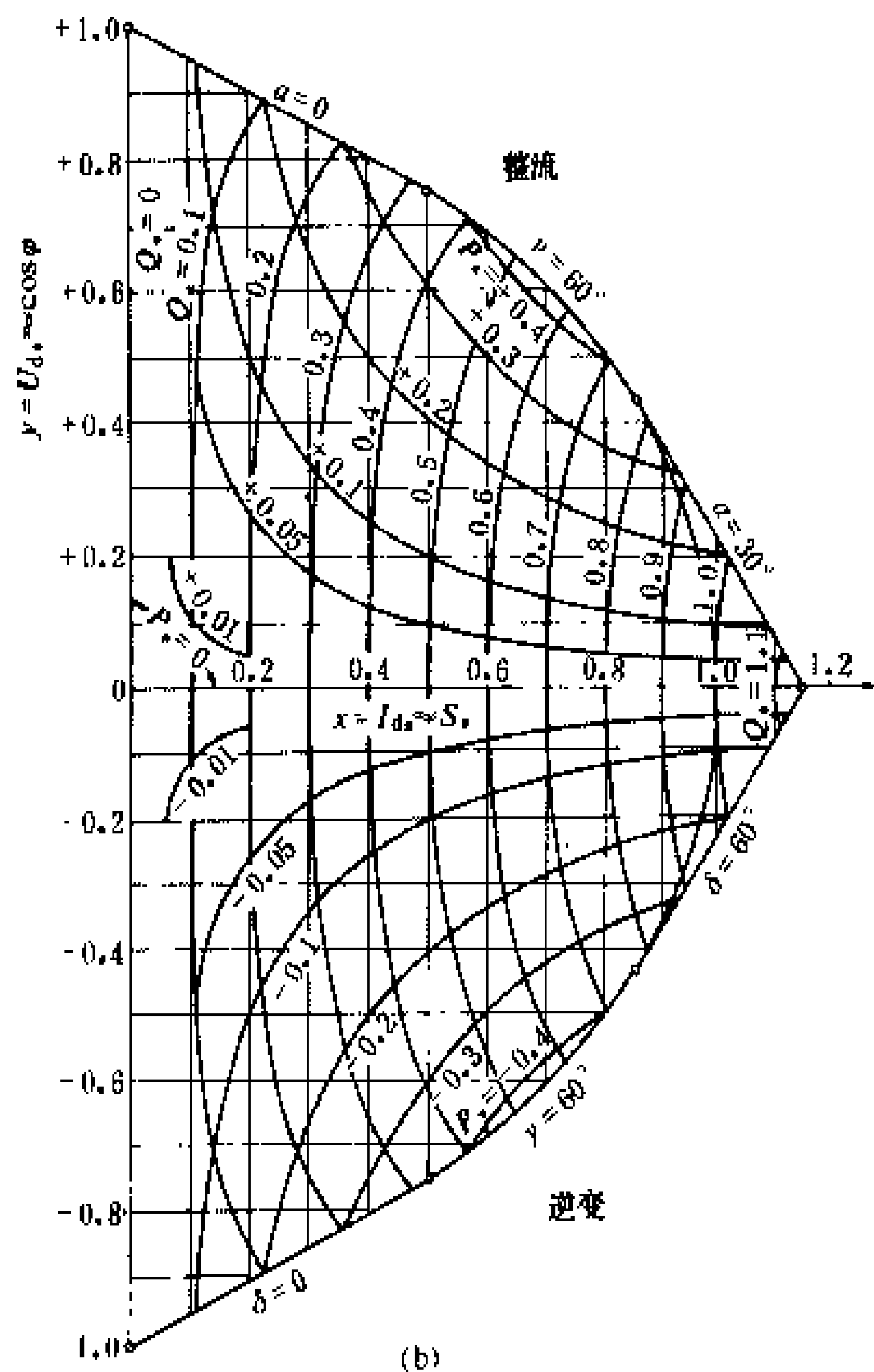
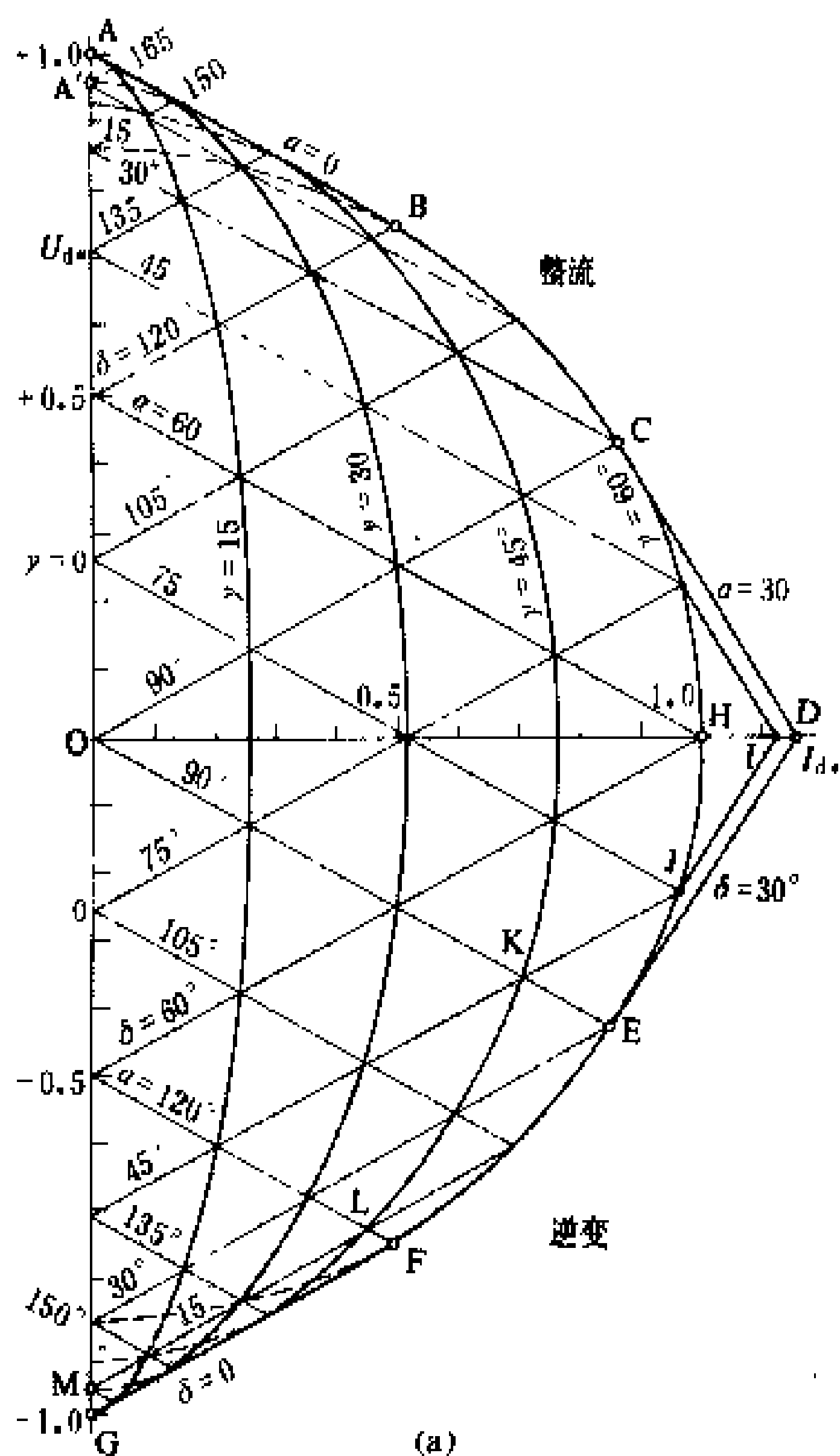


图1 六脉动换流器 $U_d-I_d$ 直角坐标系工况图

(a) 等 $\alpha$ 、等 $\delta$ 、等 $\gamma$ 曲线族; (b) 等 $P_*$ 、等 $Q_*$ 、等 $S_*$ 、等 $\cos\varphi$ 曲线族

断角相等,而 $\gamma > 60^\circ$ 时两者则不等。

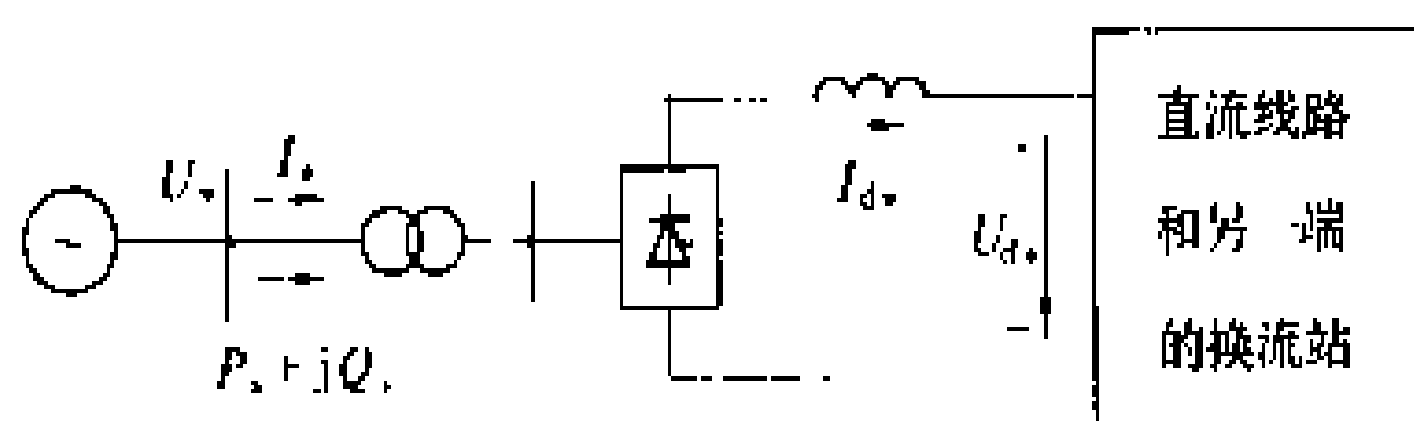


图2 电压、电流和功率参考方向

等换相角 $\gamma$ 曲线族 根据 $U_{d*}$ 与 $I_{d*}$ 、 $\gamma$ 的关系式

$$\left(\frac{I_{d*}}{2\sin\frac{\gamma}{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{d*}}{\cos\frac{\gamma}{2}}\right)^2 = 1 \quad (\gamma \leq 60^\circ)$$

$$\left[\frac{\sqrt{3}I_{d*}}{2\sin\left(\frac{\gamma}{2} + 30^\circ\right)}\right]^2 + \left[\frac{U_{d*}}{\sqrt{3}\cos\left(\frac{\gamma}{2} + 30^\circ\right)}\right]^2 = 1 \quad (\gamma > 60^\circ)$$

以 $\gamma$ 作参数绘制的曲线族如图1(a)所示( $\gamma > 60^\circ$ 的曲线未画出)。每条曲线均为椭圆曲线的一部分,表示换相角 $\gamma$ 等于某给定值时 $U_{d*}$ 与 $I_{d*}$ 的关系。

等视在功率 $S_*$ 曲线族 换流器交流侧基波电流

有效值 $I \approx \frac{\sqrt{6}}{\pi}I_{d*}$ ,所以交流电源侧基波视在功率标么值为

$$S_* = \frac{\sqrt{3}UI}{S_R} \approx \frac{3\frac{\sqrt{2}}{\pi}UI_{d*}}{U_{d0}I_{d0}} = I_{d*}$$

在 $U_{d*}-I_{d*}$ 平面上以 $S_*$ 为参数的等 $S_*$ 近似曲线是一族与横坐标轴的垂直线,如图1(b)所示。它表明 $S_*$ 等于给定值时 $U_{d*}$ 与 $I_{d*}$ 的关系。

等有功功率 $P_*$ 曲线族 忽略换流器和换流变压器功率损耗时,交流电源侧有功功率 $P_* = U_{d*}I_{d*}$ ,所以在 $U_{d*}-I_{d*}$ 平面上以 $P_*$ 为参数的等 $P_*$ 曲线是一族等边双曲线,如图1(b)所示。它表明 $P_*$ 等于给定值时 $U_{d*}$ 与 $I_{d*}$ 的关系。

等无功功率 $Q_*$ 曲线族 换流器交流电源侧基波无功功率近似值为 $Q_* = \sqrt{I_{d*}^2 - (U_{d*}I_{d*})^2}$ ,所以有

$U_{d1} = \sqrt{1 - \left(\frac{Q_1}{I_{d1}}\right)^2}$ 。根据此式可作出以  $Q_1$  为参数的曲线族,如图 1(b) 所示。它表明  $Q_1$  等于给定值时  $U_{d1}$  与  $I_{d1}$  的关系。

等功率因数  $\cos\varphi$  曲线族 换流器交流电源侧基波功率因数  $\cos\varphi \approx U_d/U_{d0} = U_{d1}$ , 以  $\cos\varphi$  为参数的等  $\cos\varphi$  曲线是一族水平线,如图 1(b) 所示。它表明  $\cos\varphi$  等于给定值时  $U_{d1}$  与  $I_{d1}$  的关系。

**P-Q 直角坐标系工况图** 换流器有功功率  $P_1$  为自变数,交流电源侧基波无功功率  $Q_1$  为应变数,其他各量作参数的曲线族图。直流输电六脉动换流器的工况图如图 3 所示,图 3(a) 绘有等视在功率  $S_1$  和等功率因数  $\cos\varphi$  两组曲线族,图 3(b) 绘出等  $\alpha$ 、等  $\delta$  和等  $\gamma$  三组曲线族。工况图第一象限对应于整流状态,第二象限对应于逆变状态,各量基准值与  $U_d-I_d$  直角坐标系工况图的相同。

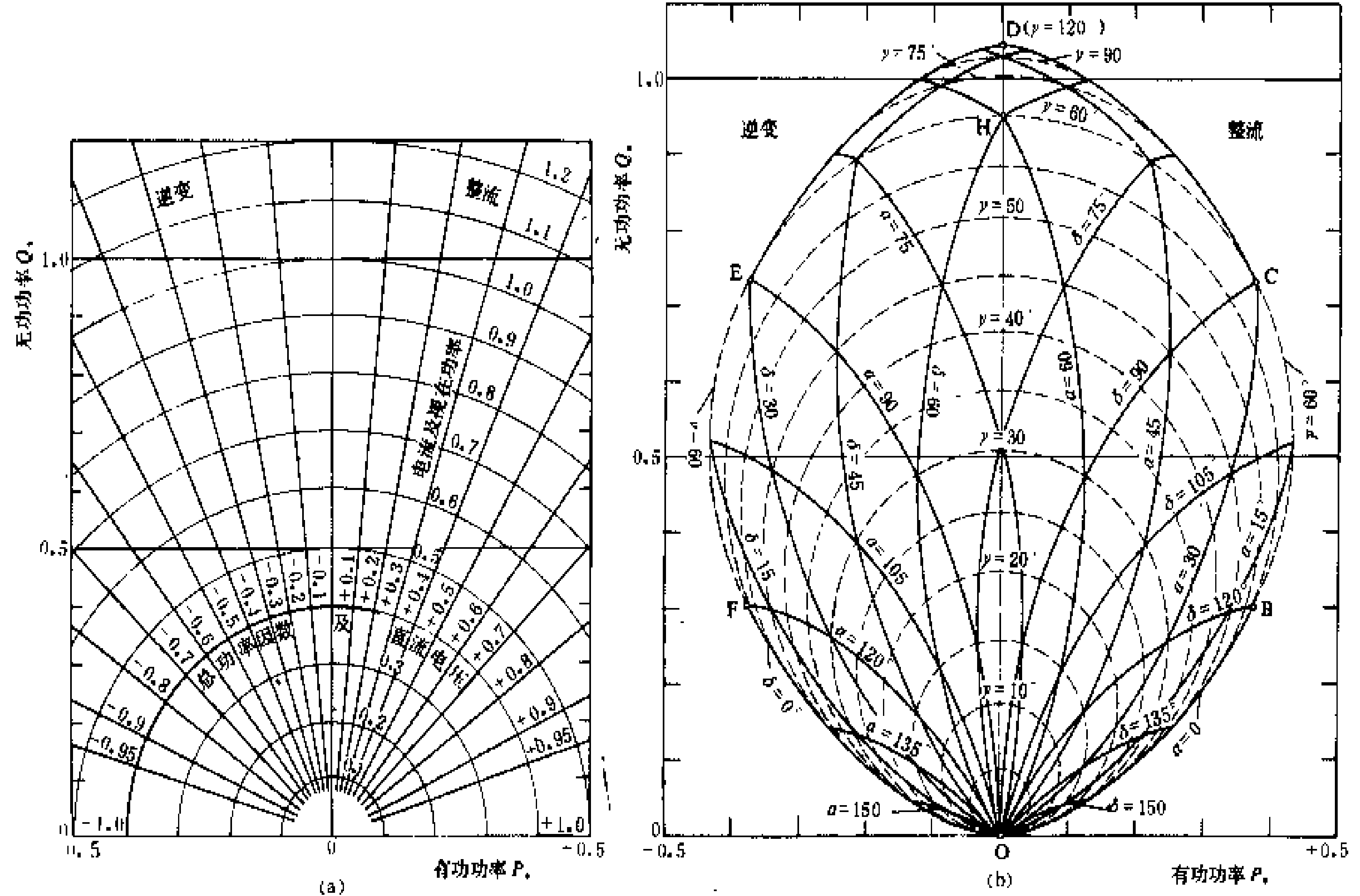


图 3 六脉动换流器 P-Q 直角坐标系工况图  
(a) 等  $S_1$ 、等  $\cos\varphi$  曲线族; (b) 等  $\alpha$ 、等  $\delta$ 、等  $\gamma$  曲线族

等  $S_1$  曲线族 在  $P_1-Q_1$  平面上  $S_1$  为不同给定值的曲线族。关系式  $P_1^2 + Q_1^2 = S_1^2$  表明该曲线族是圆心在原点、半径为  $S_1$  的同心圆,如图 3(a) 所示。此外,  $S_1 \approx I_{d1} \approx I_1$ , 所以等  $S_1$  曲线近似地表示等直流电流  $I_{d1}$  和等交流电流  $I_1$  曲线。

等  $\cos\varphi$  曲线族 在  $P_1-Q_1$  平面上基波功率因数  $\cos\varphi$  等于给定值的曲线族。从  $Q_1 = P_1 \tan\varphi$  可见,这是一族通过原点、斜率为  $\tan\varphi$  的直线,如图 3(a) 所示。由于  $\cos\varphi \approx U_{d1}$ , 该曲线族近似地表示等直流电压  $U_{d1}$  的曲线。

等  $\alpha$  曲线族 在  $P_1-Q_1$  平面上触发角  $\alpha$  等于给定值的曲线族。它是一族类似摆线的曲线,如图 3(b) 所示。

等  $\delta$  曲线族 在  $P_1-Q_1$  平面上  $\delta$  等于给定值的曲线族。如图 3(b) 中标上对应的关断角  $\delta$  值的曲线即为等  $\delta$  曲线族。

等  $\gamma$  曲线族 在  $P_1-Q_1$  平面上换相角  $\gamma$  等于给定值的曲线族。它是一族通过原点与横轴相切的圆,如图 3(b) 中虚线所示。

直流输电使用的 12 脉动换流器一般均采用桥间解耦措施,所以仍可使用六脉动换流器的工况图,但直流电压基准值和交流电流基准值要增大一倍,功率基准值实际上也增大一倍。

参考书目

浙江大学发电教研室直流输电科研组. 直流输电. 新一版. 北京: 水利电力出版社, 1985  
Kimbark E W. Direct Current Transmission. New York: John Wiley & Sons, 1971

(王官洁 吴国炎)

huanliuqi guzhang

换流器故障 (converter faults) 当直流输

电系统或有关的交流电力系统受到某种扰动时,交直流变换装置所处的非正常运行状态和过程。在此过程中,直流输电系统中某些部位可能受到过电流或过电压的危害,也可能发生电压大幅度下降,甚至直流输电中断。按照换流器非正常运行的原因和过程的特点,可能出现换相失败、误触发、误开通、不触发、不开通、桥臂短路、直流端子短路等故障。

**换相失败** 逆变器换流阀由于受到扰动未能按预计的相位开通、关断和完成换相,而处于非正常的运行状态。是逆变器较常发生的一种故障。

**原因** 由于下列原因使逆变器的越前触发角太小或关断角太小从而无法完成换相的过程而造成换相失败:①逆变侧交流系统发生短路,或大电源或大负荷投切的扰动引起换相电压幅值下降或过零点的前移;②关断角的整定值太小;③运行中出现触发角太小;④直流电流过大;⑤等值换相电抗增大。

换流器运行于整流状态时有很大的关断角,因此不会发生换相失败。

**机理和过程** 换流器在换相过程中,直流电流未能从行将退出导通的换流阀(例如  $V_i$ ) 正常转移到预期后继进入导通的换流阀[例如  $V(i+2)$ ]。这是由于换流器换相结束时,刚退出导通的换流阀电流降到零而开始关断,到退出阀的阳、阴极间电压变为正向之前,阀在负电压作用下,其元件的阻断能力尚未完全恢复,甚至换相过程尚未结束,即原来预期退出导通的阀仍在导通。在换相电压过零点之后阀  $V_i$  的电压变为正,此时  $V_i$  可能会在未加触发脉冲的情况下而自行导通,甚至阀  $V_i$  中的电流一直未下降到零而成为直通。刚触发开通的阀  $V(i+2)$  又把直流电流倒换相到刚关断的阀  $V_i$  中去,以致换相不能完成而失败。

对于 50 Hz 电力系统,关断角的最小极限值约为  $3^\circ \sim 5^\circ$  电角度,对应这一角度的时间为  $0.15 \sim 0.3$  ms,略大于晶闸管元件允许的最长关断时间。直流输电的逆变器一般采用定关断角控制或定电压控制加上关断角限制,关断角的整定值一般取  $15^\circ \sim 18^\circ$ 。关断角留有较大的裕度,是为了避免逆变侧交流系统的扰动,使实际运行的关断角动态减小过多而导致换相失败。

图 1 表明六脉动逆变器发生一次换相失败故障过程的波形。图中是以阀  $V_1$  与  $V_3$  换相失败为例,给出各阀的换相情况、逆变器直流反电压的变化和各阀的电流波形。

如果后继的阀  $V(i+1)$  对  $V(i+3)$ (相当于图 1 中的阀  $V_2$  对  $V_4$ ) 换相成功,逆变器将出现阀  $V_1$  和  $V_4$  同时导通,形成了直流端的短路。此时,逆变器与交流系统间只有在处于导通状态的阀  $V_1$  和  $V_4$  之间的一点相连,其余的四个阀都处于阻断状态。逆变器的

这种状态称为单相颠覆。

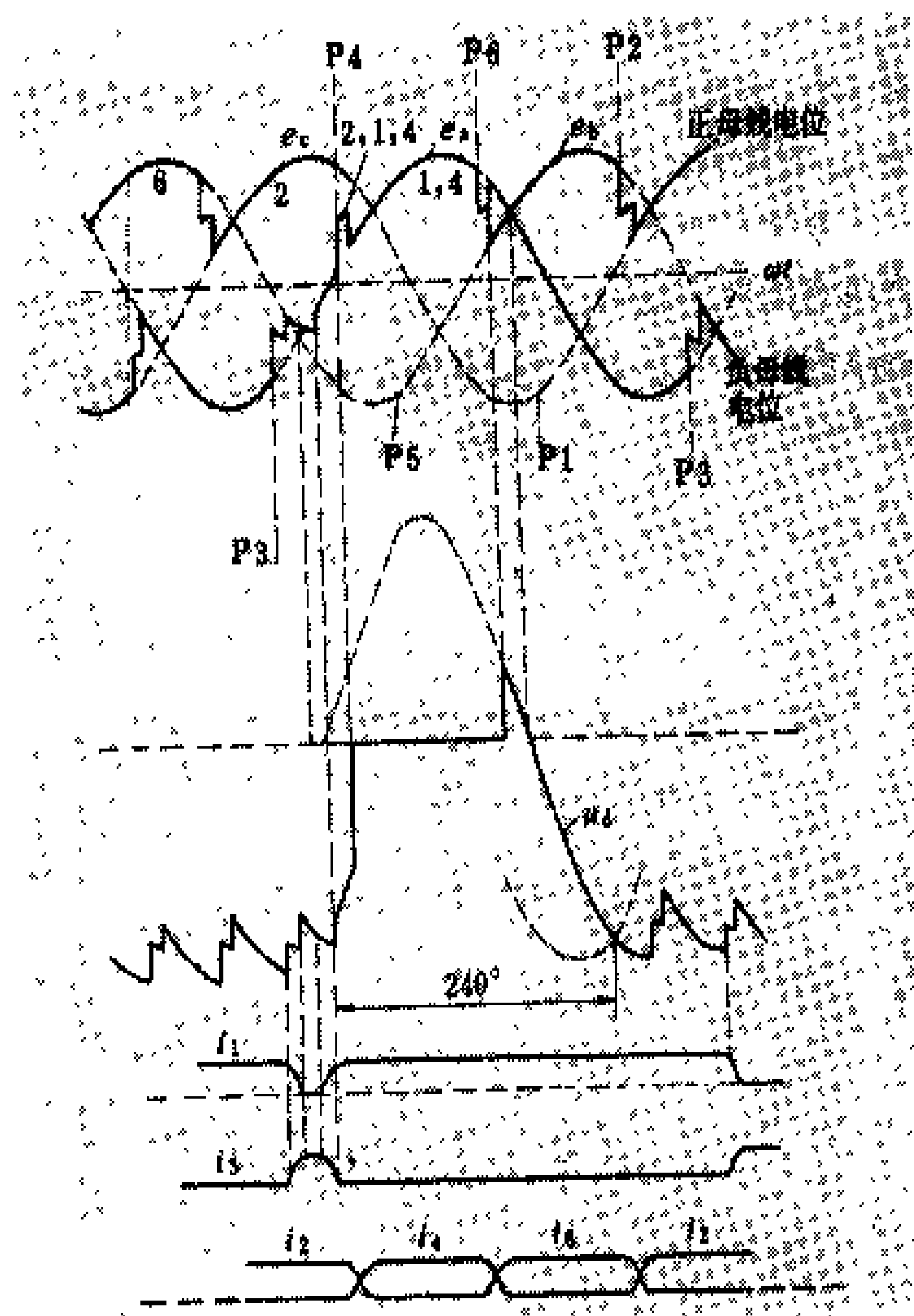


图 1 逆变器一次换相失败故障过程的波形

如果逆变侧交流电力系统较强,或控制系统采取适当增大触发角的措施,逆变器经历  $240^\circ$  直流反电压下降的不正常状态之后,能自行恢复正常运行。在此一段时间内,实际直流电流将增大;在整流侧定电流控制作用下,故障电流最大值一般不超过  $2.5 \sim 3$  倍额定电流值,直流输电系统在  $0.15 \sim 0.2$  s 之后即恢复正常。原来预计关断的阀(例如阀  $V_1$ )将连续导通  $300^\circ$  以上,可能导致换流变压器直流偏磁。如果设备中个别器件的损坏,可能导致周期性换相失败,则必须停运检修。

如果在阀  $V_i$  和  $V(i+2)$ (例如图中为  $V_1$  和  $V_3$ ) 换相失败之后,因直流电流增大又接着发生阀  $V(i+1)$  和  $V(i+3)$  换相失败(例如图中的阀  $V_2$  和  $V_4$ ),称为两次连续换相失败。其特征之一是有一个周期的交流电压加到直流线路上去,这种状态称为两相颠覆。只要不接着再发生故障,加以适当控制之后,处于两相颠覆的逆变器也可能自行恢复正常运行。如果在阀  $V_i$  和  $V(i+2)$  发生换相失败之后,在一个周期之内阀  $V(i+3)$  和  $V(i+5)$  又发生换相失败,这样的两次不连续换相失败则属于单相颠覆类型。故障过程中直流电压等于零的历时要比一次换相失败的长,使系统自行恢复的难度也增大。

**后果** 在适当的控制之下,一次换相失败故障一般能自行恢复正常,只是引起一次扰动。如果逆变侧交流电力系统较弱,则故障可能扩大,以至于必须停运。

两相颠覆时,有较大的交流基波进入直流系统,当直流侧的谐振频率接近工频时,则可能引起振荡过电压或过电流。

**判据和处理** 在逆变器换相失败发生单相颠覆时,它的直流侧电流瞬时值大于交流侧电流瞬时值可以作为逆变器换流桥交直流纵差继电保护的判据。一次换相失败只发出报警信号。多次换相失败,则须停运。

**误触发** 由于控制系统或触发系统的原因,晶闸管阀在预计不应开通的时刻受到触发的故障。当阀在正向阻断期间被误触发时,将导致误开通的故障。当阀在反向阻断期间被误触发时,将增大阀元件反向漏电流的差别,漏电流小的元件将受到过电压的危害,应尽量加以避免。

**误开通** 由于误触发、受干扰或阀电压上升率过大等原因,晶闸管阀在预计不应导通的时刻开通的故障。它只发生在晶闸管阀正向阻断期间。逆变器的正向阻断期间比整流器的长得多,发生误开通的机率大。误开通相当于阀的提早开通,整流器的正向阻断期长度为触发角 $\alpha$ ,发生误开通不会影响直流输电的运行。逆变器误开通影响最大时相当于换相失败。由于同样会出现单相颠覆,所以逆变器换流桥交、直流纵差保护对这类故障仍有效。故障处理方法与换相失败的相同。

**不触发** 由于控制系统或触发系统的原因,换流器的晶闸管阀在预计的正向电压期间未能触发的故障。

**不开通** 晶闸管阀在正向电压期间的预计开通时刻未能开通的故障。在逆变运行时,基本相当于晶闸管阀发生直通的换相失败故障。发生不开通故障的换流阀也有一段时间处于单相颠覆状态,所以换流桥的交、直流纵差保护对这类故障也有效。

**桥臂短路** 换流器的一个桥臂(或一个阀)阴阳极两端点间发生金属性短路。是整流器最严重故障之一。

**原因** ①阀的外绝缘损坏,或由于汞弧阀阳极上形成了阴极斑点而发生暂时失去反向阻断能力、正反向均能导通的逆弧故障;②晶闸管阀暂时失去正(反)向阻断能力可流过正(反)向电流的故障;③晶闸管阀永远失去阻断能力的阀击穿;④检修连接线未撤除等。汞弧阀的逆弧是较常见的故障,由一连串元件组成的晶闸管阀发生全部元件击穿的可能性是极少的。

**机理和过程** 整流桥阀正常运行时,由于阀只能单向导通,将退出导通的阀电流减小到零即关断,刚进入导通的阀电流只能增大到等于直流电流为止。当发生桥臂短路时,故障阀(如图2中的阀V1)双向都可导通,阀电流降到零之后,还可继续向负值变化;而同一换相组(如阀V1、V3和V5)三个电流的代数和要

等于直流电流。因此阀V3和V5的正向电流可能达到很大,第一周期内的最大值为交流三相短路电流 $I_{s3}$ 的1.863倍。阀V1的反向电流更大,反向最大值约为交流三相短路电流 $I_{s3}$ 的2.3倍。图2所示为整流桥在 $I_d=0$ 、 $\alpha=0$ 时阀V1发生桥臂短路时的波形。

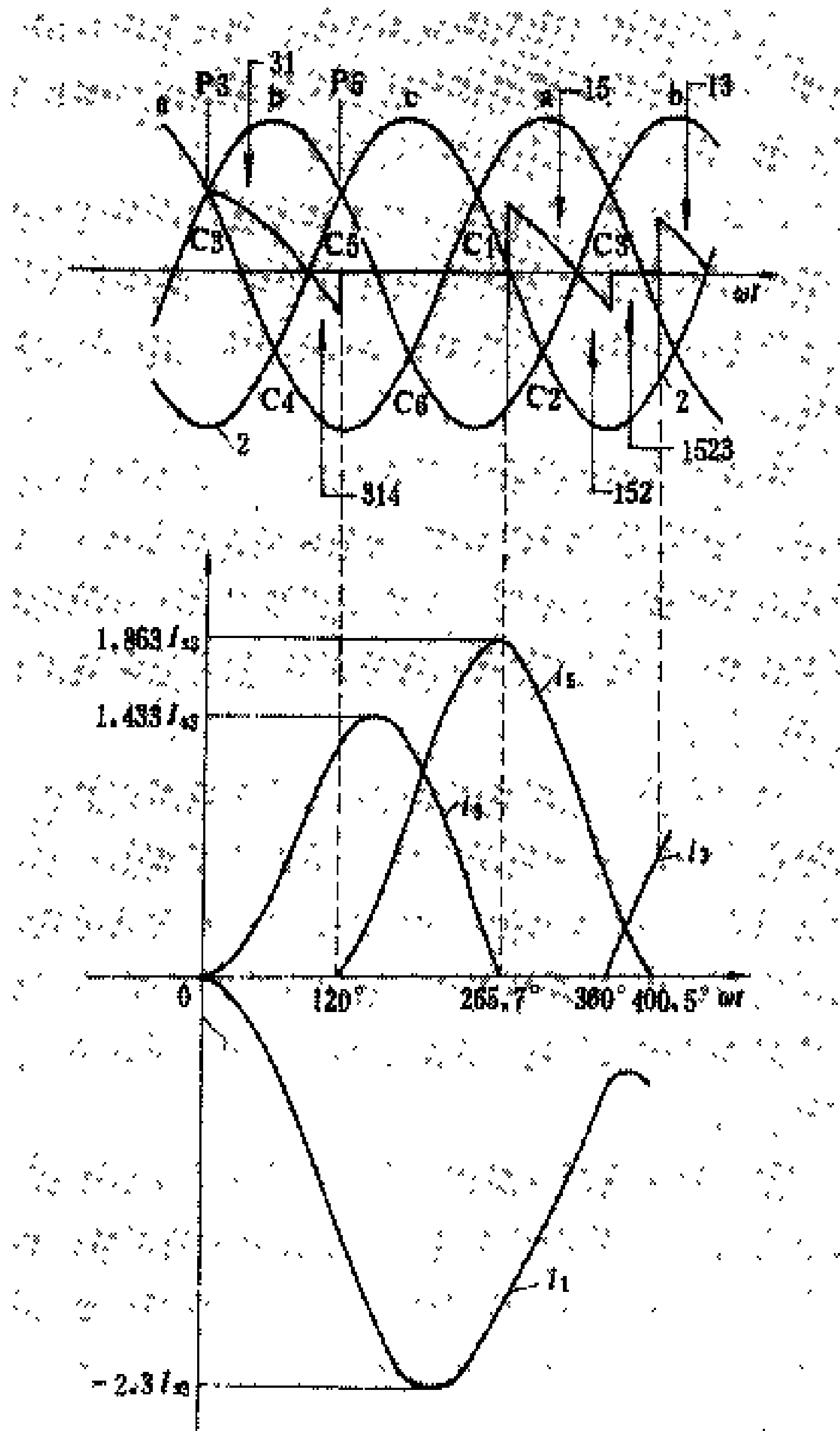


图2 整流桥在 $I_d=0$ 、 $\alpha=0$ 时, 阀V1发生桥臂短路的波形

**后果** 如果阀V1发生外绝缘故障而短路,反向故障电流虽大,但它是流经外部,阀V1内部元件是不受损害的。如果阀V1内部击穿短路,再通过故障电流也就无所谓了,但同一半桥中的健全阀V3和V5要受到过电流的威胁。减小桥臂短路故障危害的措施有两个方面:①尽快使换流器停止运行;②减小故障电流。

发生桥臂短路之后,应使换流器尽快退出运行,并予检修。汞弧阀逆弧是暂时性的,要停止工作一段时间,一般为0.5s左右,才能恢复正常工作,否则,因故障时有很大的正向故障电流流过健全阀,使汞弧阀阳极温度升高,而再次出现逆弧故障,称之为继发逆弧。晶闸管阀发生桥臂短路的可能性很小。

以往,晶闸管元件的额定容量和短时过载容量很难做得大,因而采用增大换流变压器漏抗的办法来限制桥臂短路的故障电流。目前晶闸管元件的短时过载

能力有很大的提高,更有能力来承受故障电流。换流变压器的漏抗可降到与普通电力变压器相当的数值,从而减小了无功补偿设备的容量和占地面积,也减小了相应的电能损耗,而且降低了甩负荷时的动态过电压。

由于逆变桥反向阻断期间很短,而且反向阀电压不高,所以发生桥臂短路时流过故障臂的反向故障电流是很小的,不致引起威胁和危害。

判据和处理 将换流器交流侧电流加以整流所得的电流  $i_{ac}$  与其直流侧电流  $i_{dc}$  的信号输入到整流器交直流纵差保护装置,可按照  $i_{ac} > i_{dc}$  的判据,确定桥臂短路故障。

桥臂短路是整流器较严重的故障,当判断为此故障时,保护装置应快速动作,使故障的换流器停运。为防止在直流保护拒动时,换流变压器网侧断路器跳闸产生过电压,可投入旁路阀或旁路对,使直流侧电流有流通的回路。

当逆变器发生桥臂短路时,由于故障阀失去正向阻断能力,阀在正向电压作用下,立即出现类似于误导通的过程,用于检测换相失败的纵差保护对此故障作出反应而动作。如果需要与其它故障区别开来,可增添一个附加的输入信息作为附加判据,例如故障阀电流出现负值。

整流桥直流端子短路 有时也称之为整流桥直流母线短路。其危害的严重性不亚于整流桥的桥臂短路。它与整流桥臂短路故障相类似,对阀元件构成威胁的故障电流最大值达到三相短路电流的 1.87 倍。由于这两种故障电流的回路中不包括电感值很大的平波电抗器,故障电流没有受到它的抑制,因此故障电流波形的顶部不是平直的,而由多段基波频率的正弦波形连接构成。与桥臂短路故障的主要不同在于:桥臂短路时,整流桥一个换相组的三个阀中有一个阀失去了阻断能力;直流端子短路时,全部阀仍单向导通而且正、反向阻断能力都是健全的。对直流端子短路,也可利用换流桥的纵差保护,按判据  $i_{ac} > i_{dc}$  动作。如要区别于桥臂短路,可根据阀电流有无反向来判定。

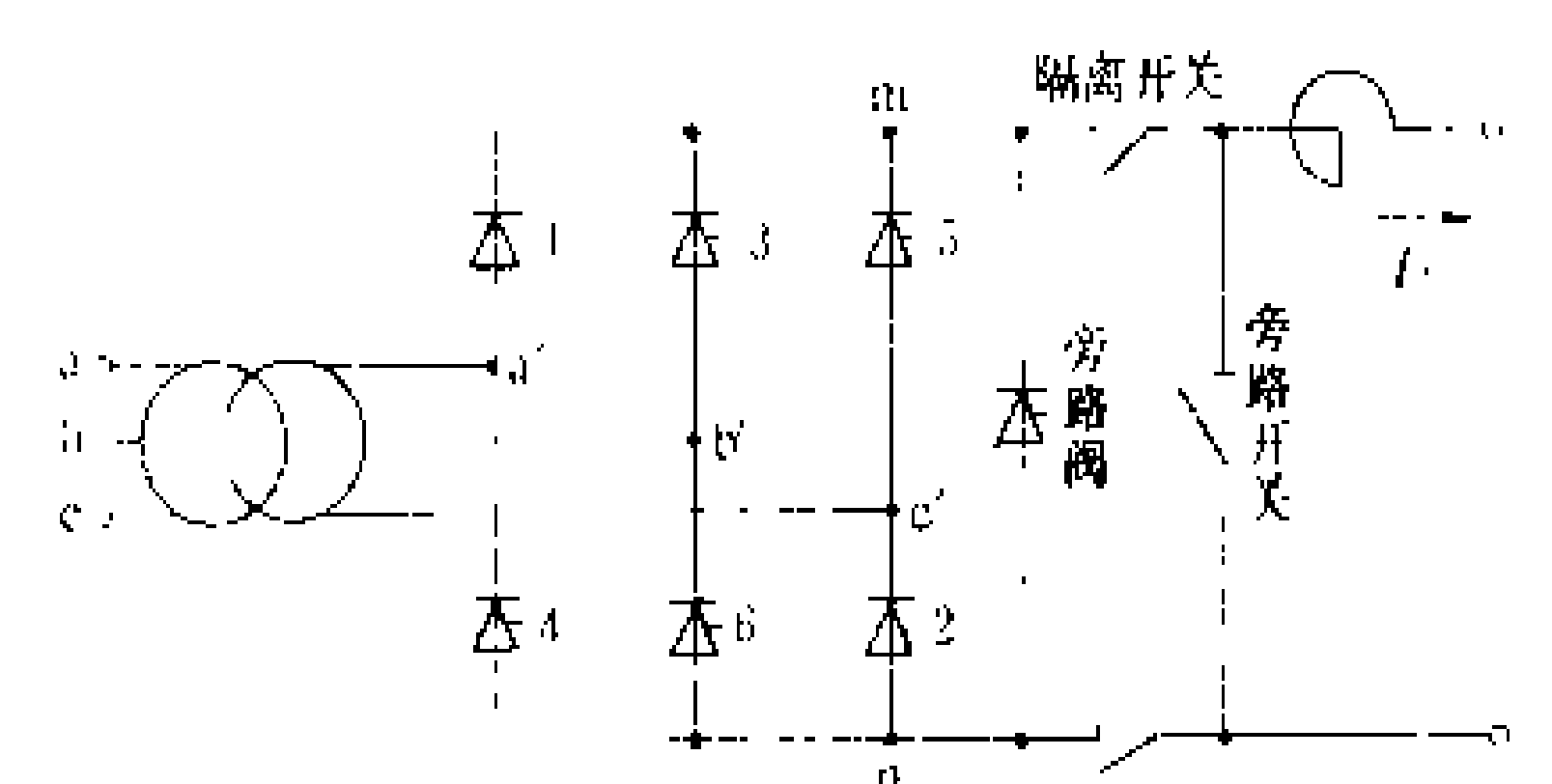
参考书目  
 浙江大学发电教研室直流输电教研组, 直流输电, 新一版, 北京: 水利电力出版社, 1985  
 Kimbark E W. Direct Current Transmission. New York: John Wiley & Sons, 1971

(赵礼生)

huanliuqi panglu

换流器旁路 (by-pass of convertor) 形成单桥或双桥换流器直流侧端子间短接的低阻电路。

它既可以是只能短时间使用的旁路阀 (by-pass valve) 或旁路对 (by-pass pair) 构成的单向通路,也可以是允许长时间使用的旁路开关 (by-pass switch) 构成的双向通路。它能为换流器直流侧电流提供一条不必流经换流变压器的通路。换流器旁路的作用为:①当处理故障时,可使过电流经低阻电路绕道而过,不致危及换流阀;②以便快速断开换流变压器网侧断路器,以利于带有故障的部分及早与交流电源脱离,而且避免交流断路器跳闸引起过电压;③也可应用于直流输电系统起停;④便于部分换流桥暂时退出运行的操作。换流桥旁路接线示意如图所示。



换流桥旁路示意图

旁路的接线和操作 旁路阀和旁路开关均并联于换流桥直流侧。换流桥正常工作时,旁路阀处于闭锁状态,旁路开关处于断开状态。当需要将指定的换流桥加以旁路时,向旁路阀施加触发脉冲,并同时闭锁换流桥正常工作的触发脉冲。此时旁路阀导通,将换流桥直流端子短接,直流电流全部转向旁路阀,运行于逆变的换流器交流侧三相电流均为零,运行于整流的换流器虽因直流端子短路,有的换流阀电流虽很大,但有等于零的时候。电流为零时交流侧断路器断开,使换流器脱离交流电源,退出运行。如果换流桥需要较长时间退出工作脱离电源进行检修,则需合上旁路开关,使直流电流从旁路阀转到旁路开关,再断开隔离开关,使换流桥直流侧也能断开而脱离。这样,换流桥和换流变压器均退出运行,可以进行检修。而直流输电系统的其余部分不必中断运行,只是直流线路电压比原有值降低了一个退出换流桥的直流电压,其输送功率也相应减小。

旁路对及其应用 利用换流桥本身接在交流同一相的两个阀同时触发开通来代替专用旁路阀的功能,以节省费用。如图所示换流桥的旁路对有阀 1 与 4 (a 相)、阀 3 与 6 (b 相) 和阀 5 与 2 (c 相) 三对可供选择。选择旁路对的原则是:①发生误导通和桥臂短路的阀可作旁路对;②无法开通的阀不能作旁路对;③在故障发生后,导通时间和电流已大于正常运行的阀不宜再选作旁路对;④能尽早实现旁路对投入的两个阀。当需要利用旁路对进行换流桥旁路时,控制系统向所选定的旁路对施加触发脉冲,同时闭锁正常工作的触发

脉冲,此时旁路对导通,直流电流从工作阀转移到旁路对。换流桥正常工作时,直流电流通过每个换流阀的时间只约为1/3工频周期,而工作在旁路对状态则须长时间连续通过直流电流。因此旁路对也像旁路阀一样仅作为能迅速建立旁路的过渡性措施,短时承担非正常电流,然后把电流转移到建立旁路动作较慢但能承担较大过电流的旁路开关上。

(赵晚君)

huanliuqi yunxing texing

**换流器运行特性** (operating characteristics of convertor) 换流器进行交直流变换时的各个运行变量间关系的数学描述,也可用曲线表示。换流器的运行变量包括交流侧电压、电流、有功功率、无功功率,直流侧的电压、电流和换流器的触发角、换相角与关断角等。表征各运行变量间关系的运行特性可分为直流侧伏安特性、谐波特性和功率特性三类。

**直流侧伏安特性** 主要表明:在作为换相电压的正弦交流电动势有效值  $E$  和触发角  $\alpha$  给定的情况下,换流器直流端口的直流电压平均值 ( $U_d$ ) 和电流平均值 ( $I_d$ ) 间关系的二维数学模型。也可用三维数学模型表述  $E$ 、 $U_d$  和  $I_d$  之间的关系。在等触发角或等关断角情况下,运行点的轨迹是一个有限的面。

当单桥换流器换相角  $\gamma < 60^\circ$  (基波电角度) 或双桥换流器  $\gamma < 30^\circ$  时,在换流器交流侧的交流电压给定的情况下,直流端的直流电压和直流电流之间存在下列函数关系,即

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos \alpha - \frac{3\omega L_\gamma}{\pi} I_d \quad (1)$$

式中  $U_d$  和  $I_d$  分别为换流器直流端直流电压和直流电流的平均值;  $E$  为交流系统提供的换相电压,它以换流变压器网侧三相正弦交流线电动势的有效值表示,计算时通常取连接交流滤波器节点的运行电压为基准,并折算为换流变压器阀侧电压;  $L_\gamma$  为换相电抗;  $\alpha$  为换流阀的触发角。

图1(a)为单桥换流器在换相角  $\gamma < 60^\circ$  时,整流器等触发角  $\alpha$  (或逆变器等关断角  $\delta$ ) 的  $U_d - I_d$  伏安特性曲线族。这些曲线与  $U_d$  轴的截距代表换流器在不同的触发角(或关断角)下的理想空载直流电压。当  $\alpha$  角增大时,截距变短;当  $\alpha = 90^\circ$ ,换流器空载输出电压为零。当直流电流增大时,从式(1)可知换流器直流电压值  $U_d$  与电流值  $I_d$  成正比地下降,伏安特性的变化轨迹成为斜线。斜率为  $3\omega L_\gamma/\pi$ ,也称为比换相压降  $d_\gamma$ 。

当触发角  $\alpha$  增大,以及  $I_d$  和换相角  $\gamma$  的增大,  $U_d$  将变为负值,即  $U_d$  的正方向与换流阀可导通方向相反,  $I_d$  不能流通,不能再起整流的作用,但在一定的条

件下可作为逆变运行。(见换流器)

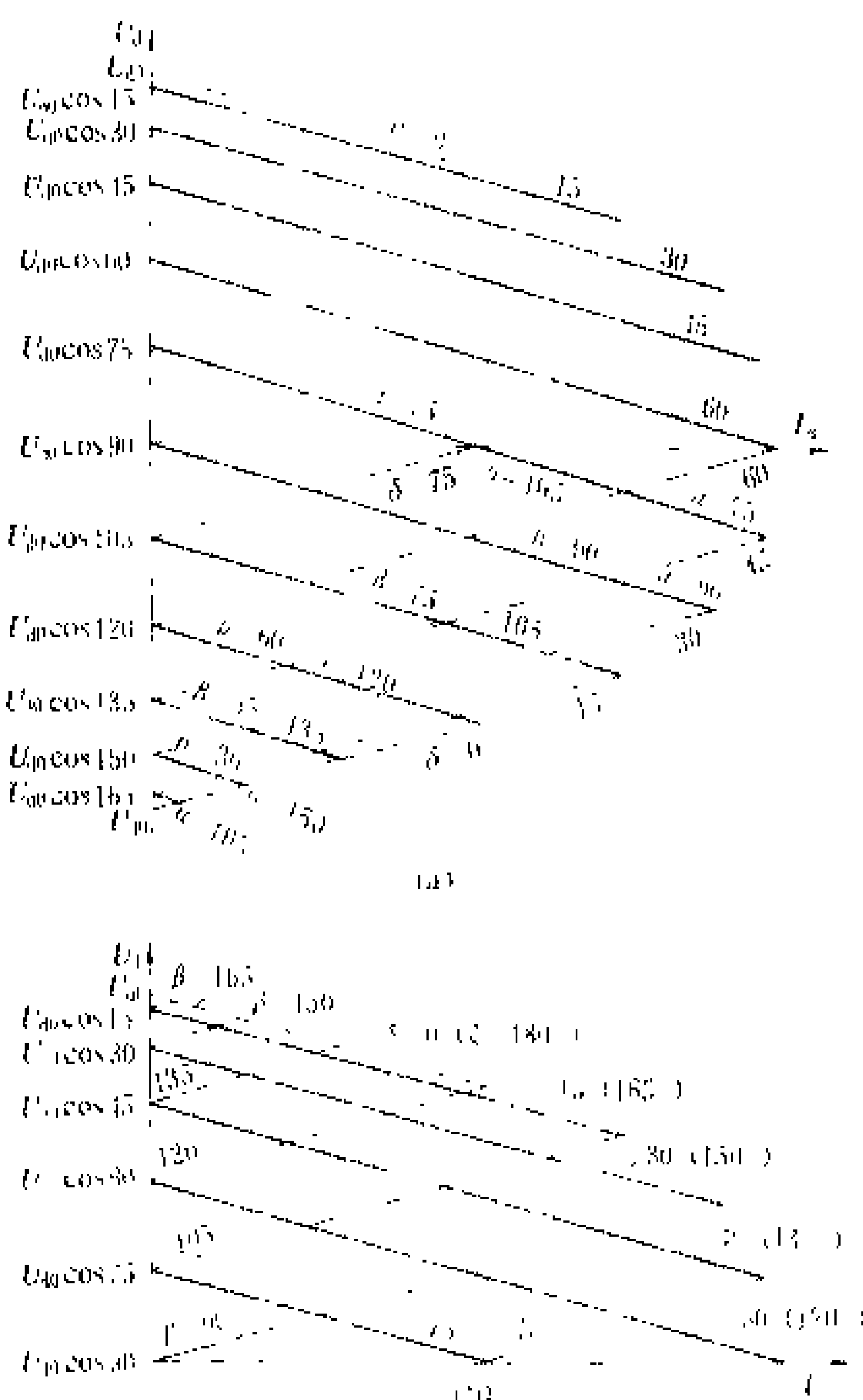


图1 换流器的伏安特性斜线族

(a) 一般的; (b) 作为逆变的

为了表达的方便,用逆变器的触发角  $\beta = 180^\circ - \alpha$  和  $\beta = \gamma + \alpha$  关系式代入式(1),可得逆变器的等触发角(或等关断角)伏安特性为

$$U_d = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos \beta - \frac{3\omega L_\gamma}{\pi} I_d \quad (2)$$

或 
$$U_d = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos \delta + \frac{3\omega L_\gamma}{\pi} I_d \quad (3)$$

如果仍按整流器一样的约定,顺着晶闸管阀可导通的方向作为  $U_d$  和  $I_d$  的正方向,则其相应的特性曲线族如图1(a)中的下半部分所示。

逆变器和整流器连接时,两者的换流阀可导通方向显然必须一致,直流回路中的电流才能流通。逆变器直流电压升高的值是负的,如果作为直流电压降或反电动势来理解,则与之相应的实际计算值应变一次正负号,即有

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos \beta + \frac{3\omega L_\gamma}{\pi} I_d \quad (4)$$

或 
$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos \delta - \frac{3\omega L_\gamma}{\pi} I_d \quad (5)$$

按式(1)~式(3)所绘制的伏安特性斜线族如图1

(a) 所示, 按式 (4) 和式 (5) 所绘制的伏安特性斜线族如图 1 (b) 所示, 亦即相应于图 1 (a) 中下半部分的斜线族变一次正负号, 也可理解为假定的正方向倒转了一次。运行点处于图 1 (a) 上半部分的换流器,  $U_d$  实际值为正, 工作于整流状态; 运行点处于图 1 (a) 下半部分的换流器,  $U_d$  实际值为负, 工作于逆变状态。显然, 横坐标轴 ( $U_d=0$ ) 是换流器整流和逆变两个运行状态的分界线。

**换流器的谐波特性** 换流器稳定运行时, 由于换流阀伏安特性具有强烈的非线性, 在换流器交直流两侧的电压和电流等变量中除了直流和工频交流主要分量外, 还有众多的频率为工频整数倍的谐波分量。在谐波频域分析中, 交、直流侧端口的谐波分量也分别包含有谐波次数为 1 的基波分量和次数为 0 的直流分量。由此也能表明在给定正弦换相电压和触发角的条件下的直流伏安特性。在此基础上再叠加上其他谐波分量, 就得到各有关变量瞬时值的频域数学模型。

由于换流阀在通断两种状态下的伏安特性参数有显著的非线性, 导致换流器的交流侧和直流侧都出现谐波。如果假定: ①三相双桥换流器所连接的三相交流电力系统的各种参数都是对称的; ②直流电流波形是平直的, 对于十二脉动换流器, 则交流侧和直流侧只分别出现次数为  $12k \pm 1$  和  $12k$  ( $k$  为正整数) 系列的特征谐波。如果换流器换相电抗小到可以忽略的程度, 并可认为换相过程是立即完成的, 则第  $n$  次特征谐波电流与基波电流之比是  $1:n$ 。如果换相过程所需的时间不可忽略时, 上述的两个电流之比将与  $1:n$  有较大的出入。(见直流输电系统谐波)

实际上往往未满足上述的①和②两个假定, 则换流器两侧除分别出现特征谐波外, 还有次数不属于  $12k \pm 1$  和  $12k$  系列的非特征谐波。

**换流器的功率特性** 换流器的功率特性按分析目的可分为两类: 一类只考虑直流侧平均值与交流正弦有效值之间的关系, 不计入谐波; 另一类同时也考虑谐波分量。

**整流器的功率因数** 在电力系统三相对称的情况下, 只要分析一相 (例如 a 相) 就可代表三相。图 2 中  $U-U$  和  $I-I$  轴线分别为相电压  $u_a$  和相电流  $i_a$  正半波的中线, 它们之间的相角差即为基波功率因数角  $\varphi_1$ 。严格地说,  $I-I$  轴线应是交流电流基波分量正半周的中线。阀导通区 T1D1 的基频角度为  $120^\circ + \gamma$ , 如果把  $i_a$  的正半周波形近似地看作为梯形, 则中线  $I-I$  与开通时刻 T1 和关断时刻 D1 的相位差均等于  $\left(60^\circ + \frac{\gamma}{2}\right)$ , 因而可以认为基波的滞后功率因数角

$$\varphi_1 \approx \alpha + \frac{\gamma}{2} \quad (6)$$

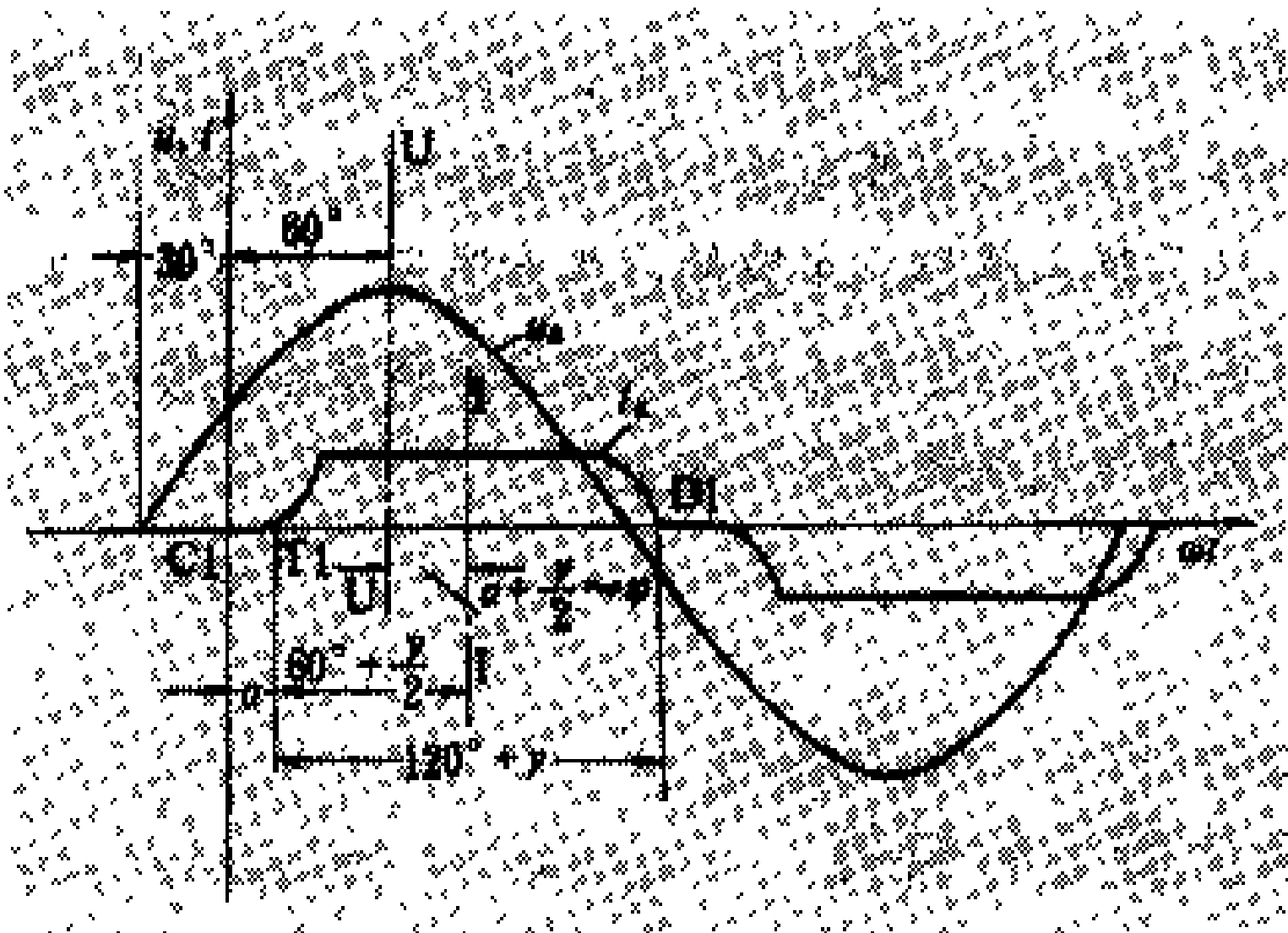


图 2 整流器的基波功率因数角

假定换流装置的视在功率为  $S$ , 并忽略换流器本身的损耗, 则换流器的总功率因数为

$$\cos \varphi = \frac{P_d}{S} = 0.955 \frac{\cos \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \cos \frac{\gamma}{2}}{\sqrt{1 - 3\varphi(\alpha, \gamma)}} \quad (7)$$

换流装置在正常工作时, 系数  $\sqrt{1 - 3\varphi(\alpha, \gamma)}$  约为 0.955, 因此上式可近似为

$$\begin{aligned} \cos \varphi &\approx \cos \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \cos \frac{\gamma}{2} \\ &= \frac{1}{2} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)] \end{aligned} \quad (8)$$

**逆变器的功率因数** 其分析计算方法与整流器相同, 但具体数值则有所不同。图 3 表明了其基波功率因数角

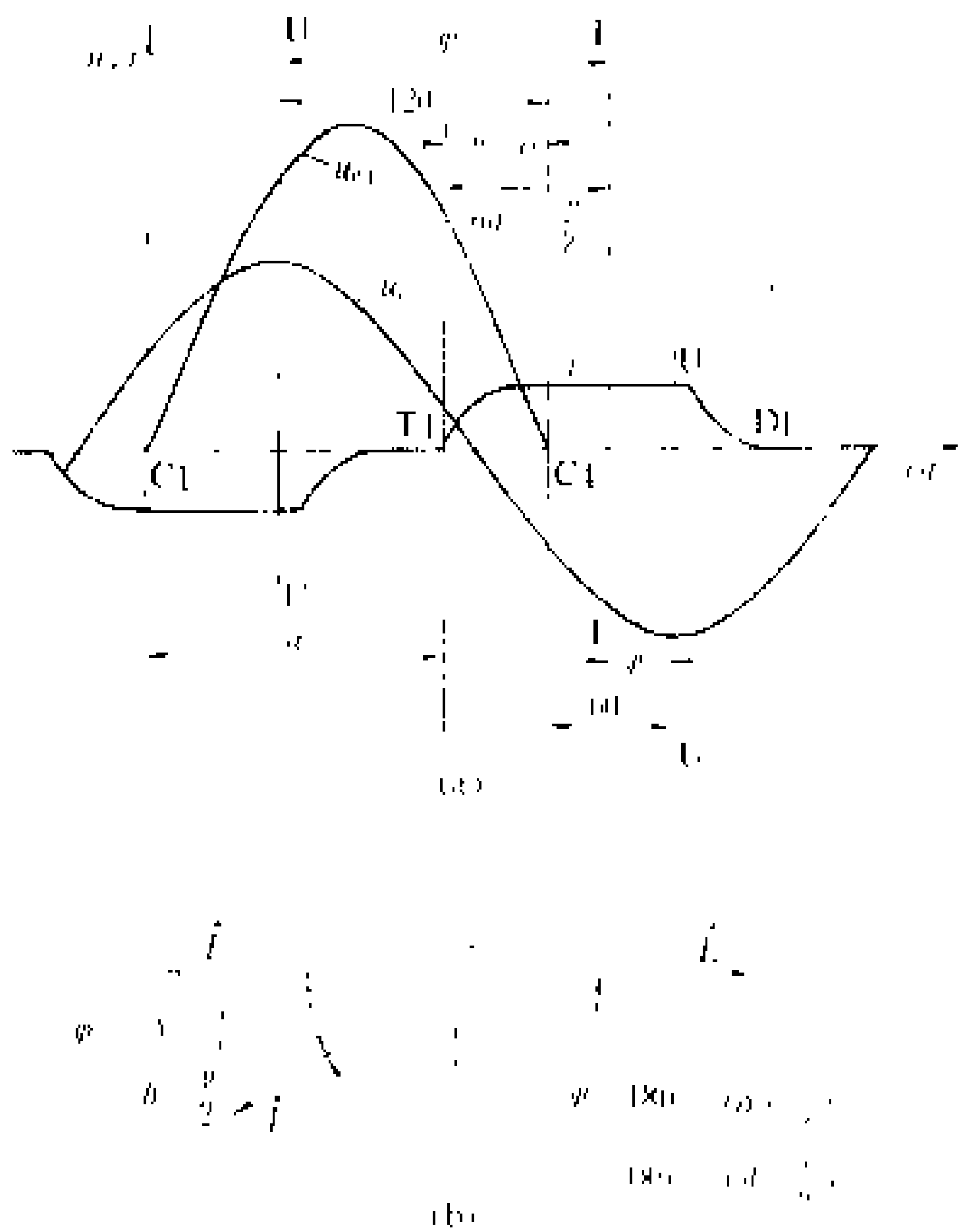


图 3 逆变器的功率因数角

(a) 波形图; (b) 电压和电流相量图



$$\varphi \approx 180^\circ - \left( \delta + \frac{\gamma}{2} \right)$$

或 
$$\varphi \approx 180^\circ - \left( \beta - \frac{\gamma}{2} \right)$$

$\varphi$ 也是滞后的。如果以负电压方向为基准,则功率因数角

$$\varphi \approx \delta + \frac{\gamma}{2}$$

或 
$$\varphi \approx \beta - \frac{\gamma}{2}$$

用式(7)和式(8)计算时,用 $\delta$ 代替 $\alpha$ 即可。

在直流输电系统正确设计和正常运行情况下,交流滤波器节点的交流线电动势 $E$ 在工程计算分析中可以认为是正弦的,换流变压器网侧绕组中不存在直流电流。因此其视在功率的平方

$$S^2 = P^2 + Q_1^2 + N^2$$

式中 $Q_1$ 为基波无功功率; $N$ 为谐波电流与基波电压形成的畸变无功功率。

参考书目

浙江大学发电教研室直流输电科研组, 直流输电, 新一版, 北京: 水利电力出版社, 1985

Kimbark E W. Direct Current Transmission. New York: John Wiley & Sons, 1971

(王官洁 任 震 赵礼生 戴熙杰)

huanliuzhan

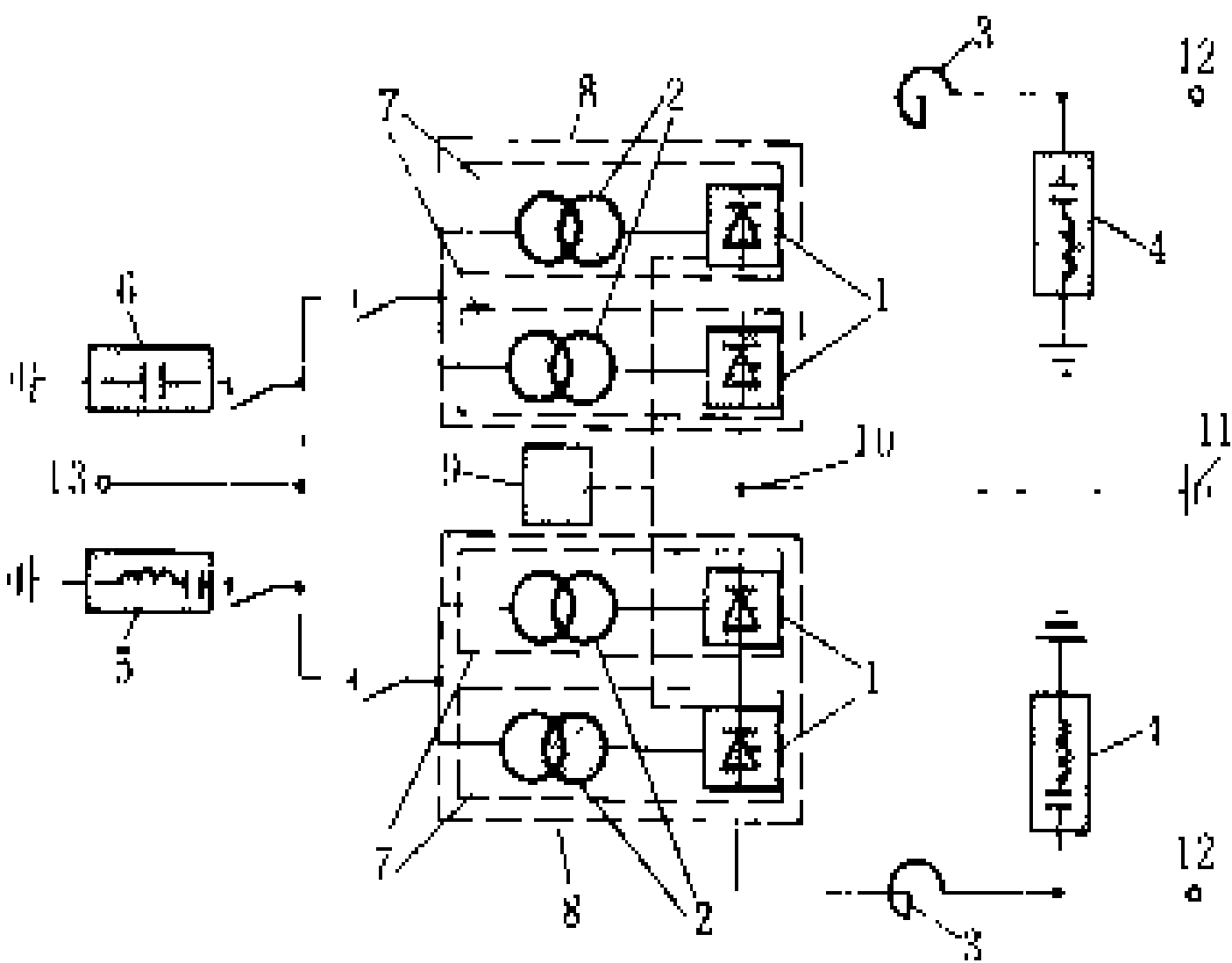
**换流站** (convertor station) 直流输电系统中实现交、直流变换的电力工程设施。换流站一侧接于交流系统,另一侧接到直流电力网络。它是直流输电系统中最重要的一环。站内装设有换流器、换流变压器、平波电抗器、换流站交流滤波装置、换流站直流滤波装置和直流输电系统控制装置等交直流变换设备和必要的辅助设备与设施。

换流站按其不同的运行方式可分为整流站和逆变站。整流站将交流变换为直流,逆变站将直流变换为交流。同一直流线路两端的换流站所装设主要设备的技术规范往往基本相同。当需要改变整流(或逆变)运行方式时,只需改变换流器的触发相位即可实现。因此,换流站既可作为整流站运行,又可作为逆变站运行。

按每一工频周期的直流脉动数(也称脉波数)不同,换流站可分为十二脉动(也称十二脉波)和六脉动(也称六脉波)两种。六脉动换流站实质上是一个三相桥式的六脉动换流器,又有单桥换流器之称;十二脉动换流站是两个相位相差 $30^\circ$ 基波电角度的六脉动换流器串级组成的十二脉动换流器,又有双桥换流器之称,

它的交流侧谐波和直流侧谐波比六脉动的小。装设单桥或双桥换流器的换流站可分别相应称为单桥换流站或双桥换流站。

换流站直流侧端子和接在端子上的导线对地的电位有正负两极。按直流极的数目分,有双极换流站和单极换流站两种。图中表示了双极换流站的主要构成环节和典型主接线。换流站的直流端和直流线路导线的



直流输电换流站各构成部分示意图

- 1—换流桥; 2—换流变压器; 3—平波电抗器; 4—直流滤波器; 5—交流滤波器; 6—无功功率补偿设备; 7—六脉动换流器; 8—十二脉动换流器; 9—控制装置; 10—中性点; 11—接地电极; 12—直流端(或极),接到直流线路; 13—交流端(或三相),接到交流三相电力系统

极性由换流站接线方式和运行方式决定。图中的主接线所表示的换流站如果运行于整流状态,上面一个极是正的;如果运行于逆变状态,上面的一个极是负的。正负极间的中点,也称为中性点,它连接到接地电极,以固定整个直流输电系统对地的电位。中性点又可将换流站分为对称的两个半站,分别称为正极半站或负极半站。有的工程为了分期投资,可先建一个半站。

参考书目

戴熙杰主编, 直流输电基础, 北京: 水利电力出版社, 1990

(王继樵)

huanliuzhan bileiqi

**换流站避雷器** (arresters in convertor station) 安装在换流站内作为各种电气设备过电压保护用的非线性限压装置。由于避雷器的保护特性决定着被保护设备的绝缘水平,所以避雷器是换流站绝缘配合的基础。按照作用在避雷器上的长期工作电压性质的不同,换流站避雷器可分为交流避雷器和直流避雷器两大类。

换流站中的交流避雷器与交流变电所中的避雷器

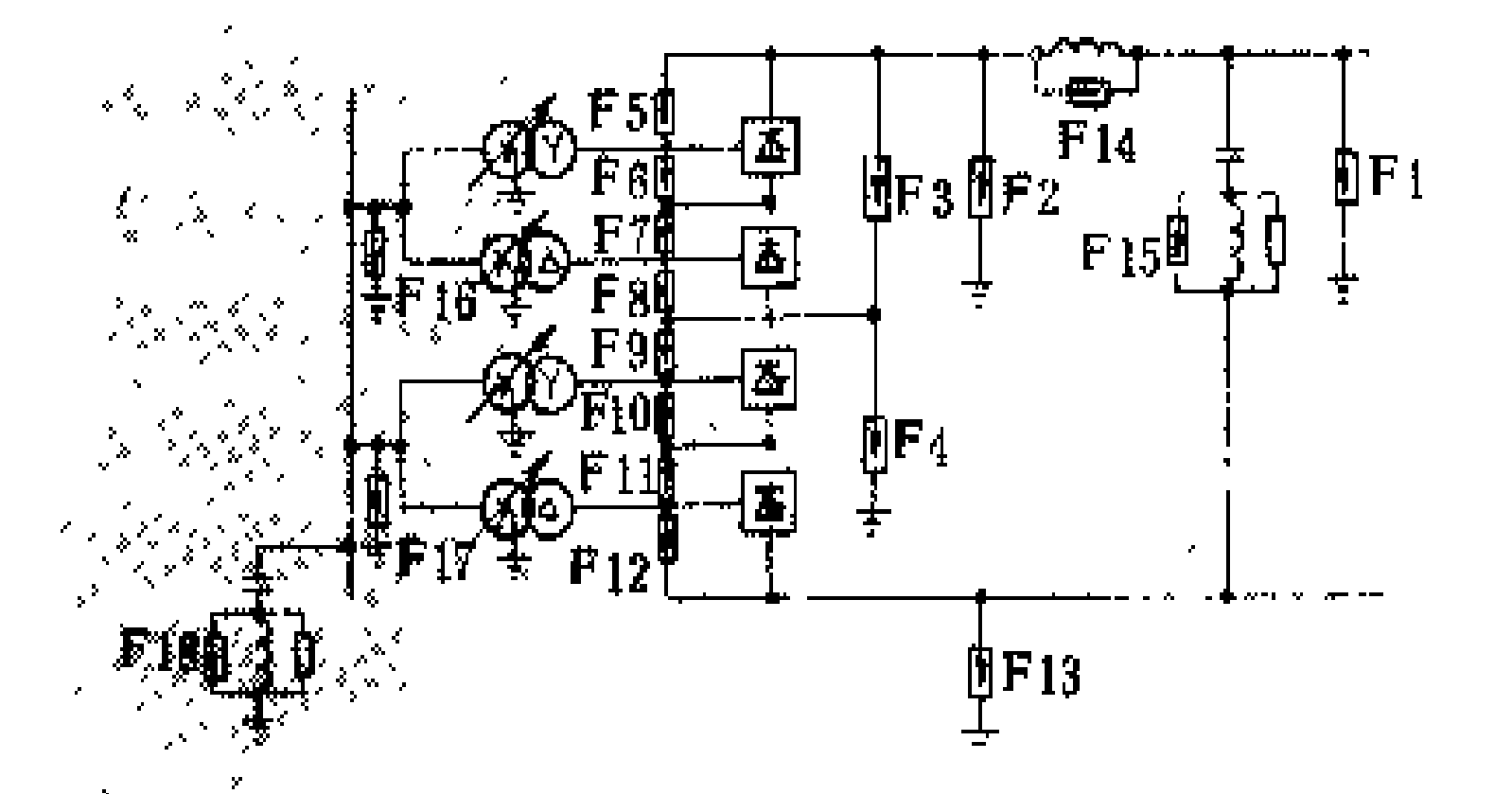
基本相同。换流站直流部分的过电压保护装置经历了保护间隙、碳化硅有间隙直流避雷器和金属氧化物无间隙避雷器三个发展阶段。

**保护间隙** 早期建成的直流输电工程大多采用保护间隙作为主要的直流过电压保护装置。它的结构简单，价格便宜，坚固耐用，通流能力大，但它的放电电压不稳定，没有自灭弧能力。因为直流输电系统中有完善的控制调节系统，在保护间隙动作之后，能自动降低直流电流到零，并进行灭弧，然后再自动再启动，恢复直流送电能力。

**碳化硅直流避雷器** 直流避雷器的运行条件和工作原理与交流避雷器有很大的差别，主要有：①交流避雷器可利用电流自然过零的时机来切断续流，而直流避雷器没有电流自然过零点可资利用，因此灭弧较为困难；②直流输电系统中电容元件（如长电缆段、滤波电容器、冲击波吸收电容器等）远比交流系统的多，而且在正常运行时均处于全充电状态，一旦有某一只避雷器动作，它们将通过这一只直流避雷器进行放电，所以直流避雷器的通流容量要比交流避雷器的大得多；③正常运行时直流避雷器的发热较严重；④某些直流避雷器的两端均不接地。总之，直流避雷器的运行条件要比交流避雷器的严酷得多，因而对直流避雷器提出的技术要求很高，以致直到 20 世纪 60 年代才研制出合格的碳化硅有间隙直流避雷器。

**金属氧化物避雷器** 对直流避雷器所提出的技术要求是：非线性好，灭弧能力强，通流容量大，结构简单，体积小，耐污性能好。这些要求正好是 20 世纪 70 年代以后发展起来的金属氧化物避雷器的突出优点，所以它正在逐渐淘汰传统的碳化硅有间隙避雷器而成为直流输电系统比较理想的过电压保护装置。由于金属氧化物避雷器的伏安特性要比碳化硅的优越得多，所以通常不再需要有串联间隙，故有时也被称为无间隙避雷器。（见金属氧化物避雷器）

**换流站避雷器配置** 避雷器在换流站内的配置方式尚未标准化。如图所示为一种采用晶闸管阀的换流站避雷器的配置方案，图中各避雷器的名称及其主要保护对象列于表。



采用晶闸管阀换流站的避雷器配置图

换流站中的避雷器

避雷器编号	避雷器名称	主要保护对象
F1	直流线路避雷器	平波电抗器的直流线路侧
F2	直流母线避雷器	平波电抗器的阀侧
F3	桥避雷器	极换流器的上半部
F4	极中性点母线避雷器	极中性点直流母线，极换流器的下半部
F5~F12	阀避雷器	晶闸管换流阀
F13	中性点母线避雷器	中性点母线
F14	平波电抗器避雷器	平波电抗器两端子间
F15	直流滤波器避雷器	直流滤波器的电感元件
F16、F17	交流母线避雷器	交流母线及换流变压器网侧绕组
F18	交流滤波器避雷器	交流滤波器的电感元件

（沈赞坝 赵智大）

huanliuzhan chongji bo xishou dianrongqi

**换流站冲击波吸收电容器** (surge absorbed capacitor in convertor station)

直接或间接跨接在直流线路的极导线端或接地极引线端与站接地网间用以吸收入侵冲击波能量的电容器，又称直流冲击电容器。通常安装在换流站直流线路的极导线和接地极引线入口处。主要用于降低加到换流站设备上的雷电冲击波的幅值和陡度。它是换流站防雷保护设备之一。当雷电过电压由直流线路入侵换流站时，减小过电压波的陡度，而且还能降低大多数雷电过电压波的幅值，从而减少雷电所引起的绝缘闪络次数。但有些直流工程不采用这种电容器。

极导线的冲击波吸收电容器的电容量约为 0.1~1μF。在接地极引线入口处的电容器采用较大的电容量，约为 5~10μF。它们与直流线路避雷器及中性母线避雷器相配合，可以使进入换流站的雷电过电压波的幅值和陡度均减小到对换流站设备（特别是晶闸管阀）无害的程度。此外，它们还能附带起到减小直流脉动的作用。

（沈赞坝）

huanliuzhan fuzhu sheshi

**换流站辅助设施** (auxiliary equipments of convertor station)

保证换流站主设备正常工作所需的其他设施。主要包括：站用电系统、换流阀冷却系统、阀厅空调系统、消防设施及接地网等。

**站用电系统** 与交流变电所所用电系统基本相同，一般有 380/220V 三相交流和 220V 或 110V 直流。

直流一般由蓄电池提供。但可靠性要求和抗干扰要求都比变电所的要高。

**可靠性要求** 换流站对站用电的可靠性要求比交流变电所对所用电的要求要严格得多,主要包括:①换流阀控制、调节、远动及触发脉冲装置必须不间断地连续工作,站用电的瞬间中断都是不允许的。这些装置的供电电源随制造厂的设计不同,可以是交流,也可以是直流,均必须采用不停电电源供电。②对于一些特殊设备,例如有些直流电压互感器、直流电流互感器采用交流助磁的交流供电电源,也必须采用连续可靠的供电系统,以保证控制、调节、保护及测量设备可靠地工作。③对于换流阀冷却系统的各种用电装置,如风机、水泵、油泵等,根据制造厂允许断电时间来设计站用电系统,一般允许采用交流双电源自动投入备用电源的供电系统。

**抗干扰要求** 由于换流阀的控制、调节、远动(包括通信通道)及触发脉冲均为弱电系统,为确保其稳定可靠地工作,在供电系统上必须严格采取防止干扰的措施,如采用与外界屏蔽的独立电源供电。

**换流阀冷却系统** 换流阀的冷却介质有空气、水、油及氟利昂冷却工质等。为了保持冷却介质高度的可用率,冷却装置必须按直流极数或更小的单元来划分,同时冷却回路中的各种设备必须有足够的备用台数与容量。由于换流阀的冷却介质承受很高的电压,所以对各种冷却介质的质量及纯度均有严格的要求。为保证安全运行,须对冷却介质不断进行测量与监督,并及时进行处理。其处理方式须根据制造厂的要求和工程具体情况而定。

当今世界上采用空气冷却和水冷却换流阀的较多,随着单阀容量的增大,水冷阀有增多的趋势。对水冷阀的冷却介质有水质、水压、流量及水温等方面的要求。①水质:一般要求导电率为 $20\sim 50\mu\text{S}/\text{m}$ , pH值为 $6\sim 8$ ,当导电率为 $100\mu\text{S}/\text{m}$ 时仍能短时运行;②水压:一般在 $0.3\sim 0.6\text{MPa}$ 范围内;③流量:决定于晶闸管元件的冷却要求,同时应满足阀体内防止电腐蚀所必须的最低允许流速的要求,由制造厂提供具体数据;④水温:一般进水温在 $20\sim 30^\circ\text{C}$ 范围内,由制造厂定。进水温度过低会造成阀体表面凝露,过高则影响冷却效果,使阀的出力减小。

**阀厅空调系统** 为保持换流阀的绝缘良好,避免阀内元件沿面闪络或击穿,必须保持阀内元件表面清洁而且不凝露。利用空调系统来保持阀厅干燥,并控制阀厅空气温度,可保证阀体表面不结露。为保持阀厅的清洁,采用闭式循环的空调系统,对少量补充空气进行严格的净化与过滤,阀厅内维持微正压,以防止外界尘埃的进入。

**消防设施** 换流站的消防设施基本与常规交流变电所的相同(见变电所防火与防爆)。阀厅内可设烟雾报警装置、化学灭火设备或消防栓。

**接地网** 换流站中各种设备的保护接地方式基本与交流变电所的相同(见变电所接地装置)。但对工作接地,有特殊的要求。换流站的工作接地可分为直流输电接地电极和电位接地。电位接地是否可与换流站总接地网相连,需要核算直流接地短路电流通过换流变压器中性点时是否会引起换流变压器的磁偏,必要时可与总接地网分开,或在换流变压器中性点接地回路中串接电阻。换流站的直流电位接地一般是引出独立的接地极,以分散接地短路电流,然后再与换流站总接地网相连。

(郑德明)

huanliuzhan gaopin zusaizhuangzhi

**换流站高频阻塞装置** (line trap in convertor station) 电力线载波通信系统中用以阻塞传导噪声以减少对载波通信干扰的装置,简称阻波器。它串接在换流站高压直流或交流输电线路进出线端,在载波频率及相应频带宽度内呈现高阻抗,用以阻塞由换流器工作过程中所引起的传导噪声进入两侧的交流系统,以减少对载波通信的干扰。还可防止载波通信系统的载波信号过度衰耗,以保证通信的可靠性。

高频阻塞装置有时也装在阀厅穿墙套管中,以图将换流器运行所发生的高频率噪声干扰阻塞于阀厅之内,减少沿线路向外界传播。

(沈赞坝)

huanliuzhan jiaoliubufen guzhang

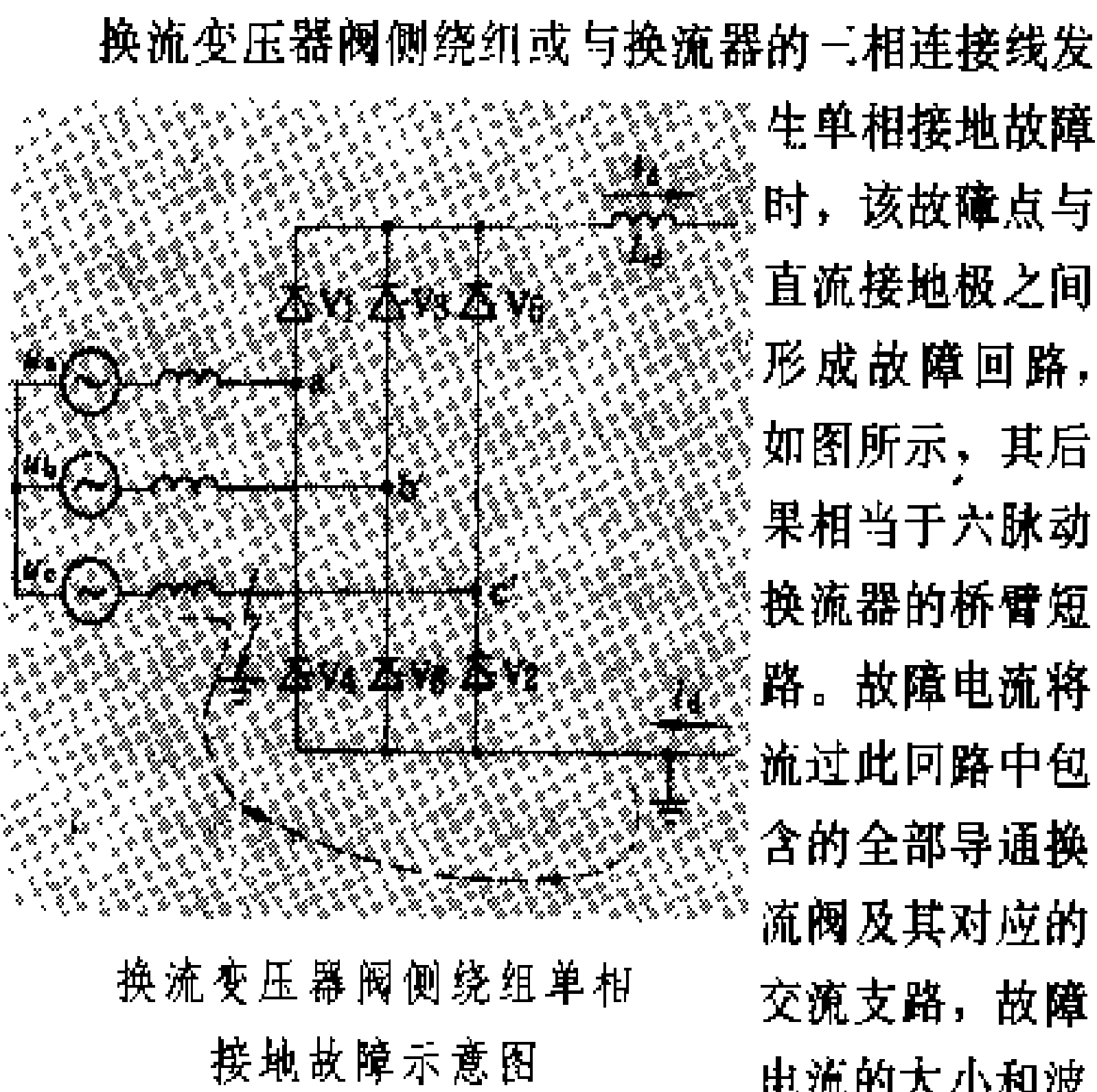
**换流站交流部分故障** (AC part faults of convertor station) 发生于换流站内交流设备和工程设施中的故障及非正常状况。换流站中的交流设备和设施包括:交流母线、换流变压器、交流滤波器、无功补偿设备、交流开关设备、测量设备、连接导线等。各交流设备都配置有相应的继电保护装置。按故障对直流输电的影响和保护装置的正确处理方式可分为主回路交流部分和横向并联交流部分两类。在主回路交流部分跳闸之前,直流回路要先作处理;横向并联交流部分跳闸时不必先对直流回路进行处理。

**横向并联交流部分故障** 交流滤波器、无功补偿装置及其连接线、支路开关等均属于横向并联的交流部分。这些设备故障时由与其相连的交流系统将向故障点送短路电流。直流系统不会向故障处提供稳态短路电流。但故障会波及直流系统,甚至会引起直流系统短时停运。随着该并联的故障支路跳闸脱离电源,在滤

波器尚能正常发挥作用的情况下，直流输电将自动恢复正常，但需根据并联设备容量配置情况，对恢复运行的直流系统的运行状态或输送功率作相应调整。

**主回路交流部分故障** 交流母线、换流变压器及其交流网侧断路器以及换流变压器至换流器的三相交流连线等均属主回路的交流部分。两端直流输电采用的多桥接线中直流回路为串联连接方式，交流部分的换流变压器网侧绕组为并联连接方式。

当主回路交流部分任何一处发生相间短路时，由该侧交流系统向故障处提供短路电流，故障电流则不通过换流阀，因此对换流阀的安全没有威胁。但故障会造成直流输电暂时停运。将故障部分与交流系统隔离，并对相应换流器作直流旁路处理后，其它交流主回路能继续进行正常换流。



形与换流阀的控制角有关。

(赵礼生)

huanliuzhan jiaoliu lubo zhuangzhi

**换流站交流滤波装置** (AC harmonic filters in converter station) 安装在换流站交流侧用来吸收换流器交流侧谐波电压、电流的装置，简称交流滤波器。分有源滤波器和无源滤波器两种。有源滤波器有磁通补偿、谐波注入以及直流纹波注入等多种型式，但尚待进一步研究开发；无源滤波器主要由电阻、电容、电感等组成。换流站交流滤波装置一般由若干个单独用于吸收某些指定次数谐波的三相滤波器组并联而成，三相滤波器组内三个相同的滤波器各自接成星形。每个滤波器在一个或两个谐波频率的指定变化范围内或高通频带下呈现低阻抗，使换流站交流侧对应于这些频率范围或高通频带内的谐波电流绝大部分流入滤波器，从而减少注入交流系统的谐波，达到降低谐波的要求。目前广泛使用的交流滤波器有单调谐滤波器、双

调谐滤波器和两阶高通滤波器三种。

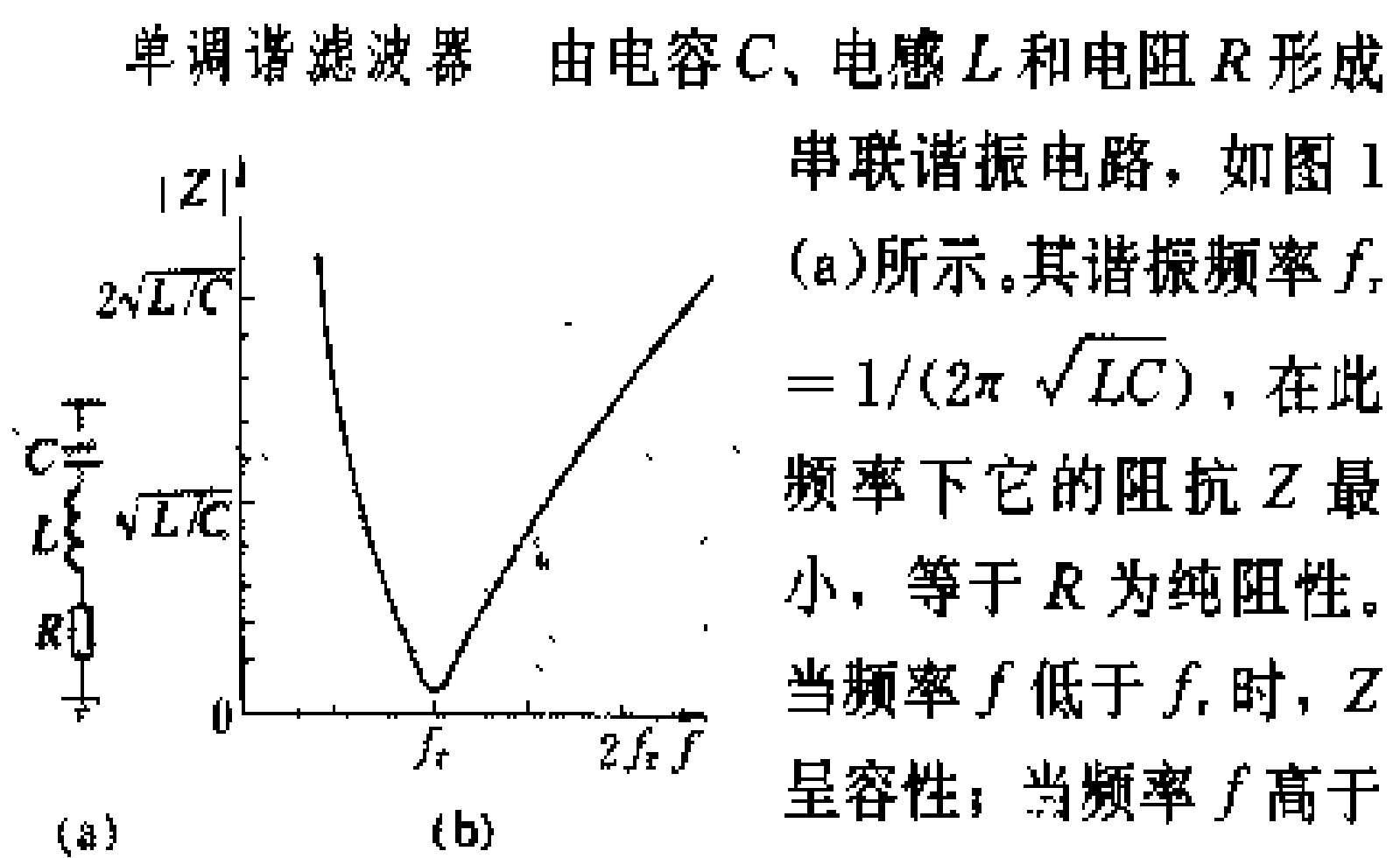


图 1 单调谐滤波器 (a) 电路；(b) 频率-阻抗特性

单调谐滤波器常用于吸收 5、7、11、13 等谐波分量较大的低次特征谐波。滤波器的每个谐振频率对应于一个谐波频率。

**双调谐滤波器** 其电路如图 2 (a) 所示，在特性上相当于两个并联的单调谐滤波器。它能同时吸收两种频率的特征谐波电流。其阻抗特性如图 2 (b) 所示。

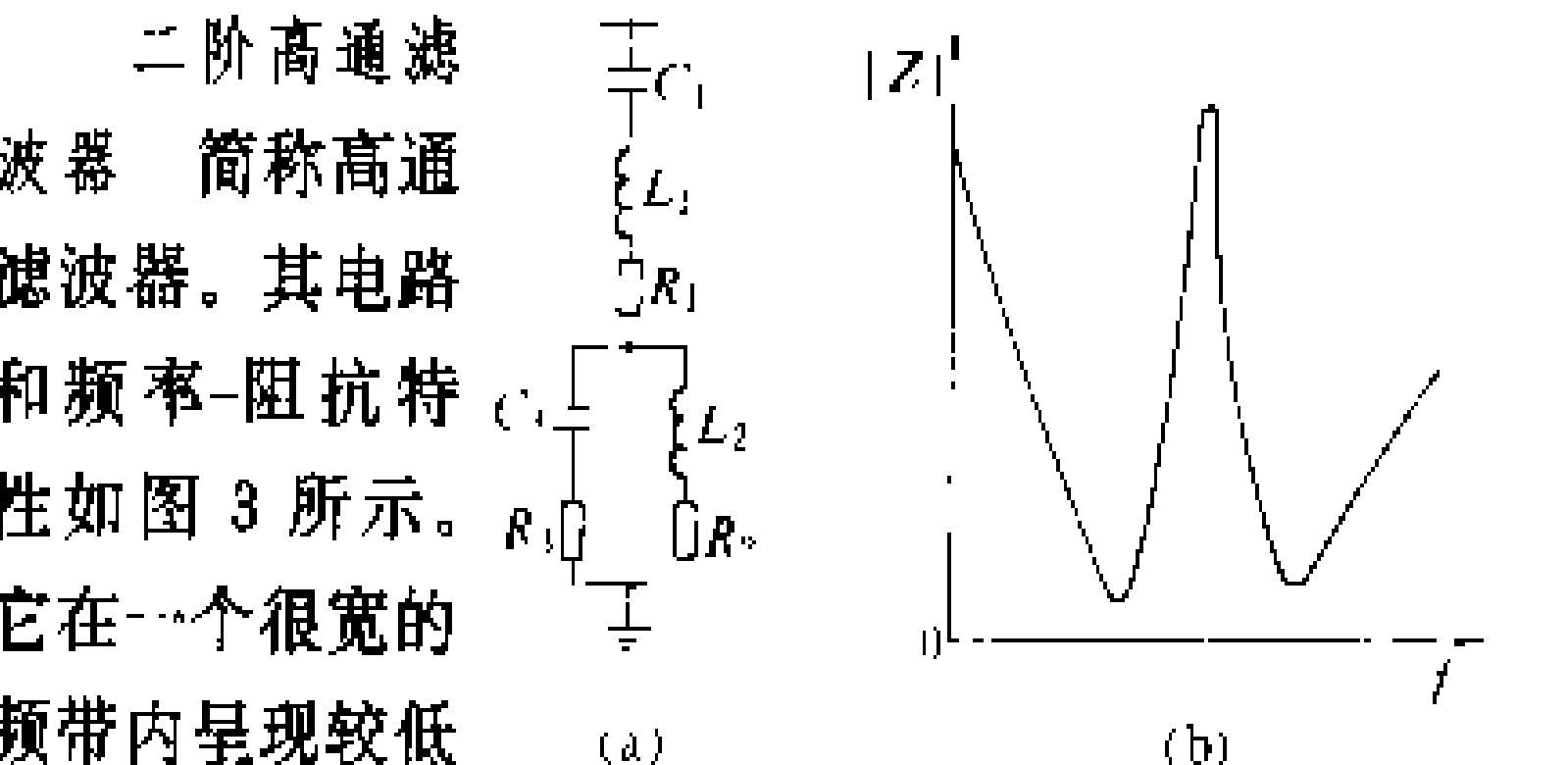


图 2 双调谐滤波器 (a) 电路；(b) 频率-阻抗特性

**交流滤波装置的设计与运行** 交流滤波装置的设计首先要考虑抑制谐波的效果，使流入交流系统的谐波电流及换流站交流主母线上的谐波电压满足运行所

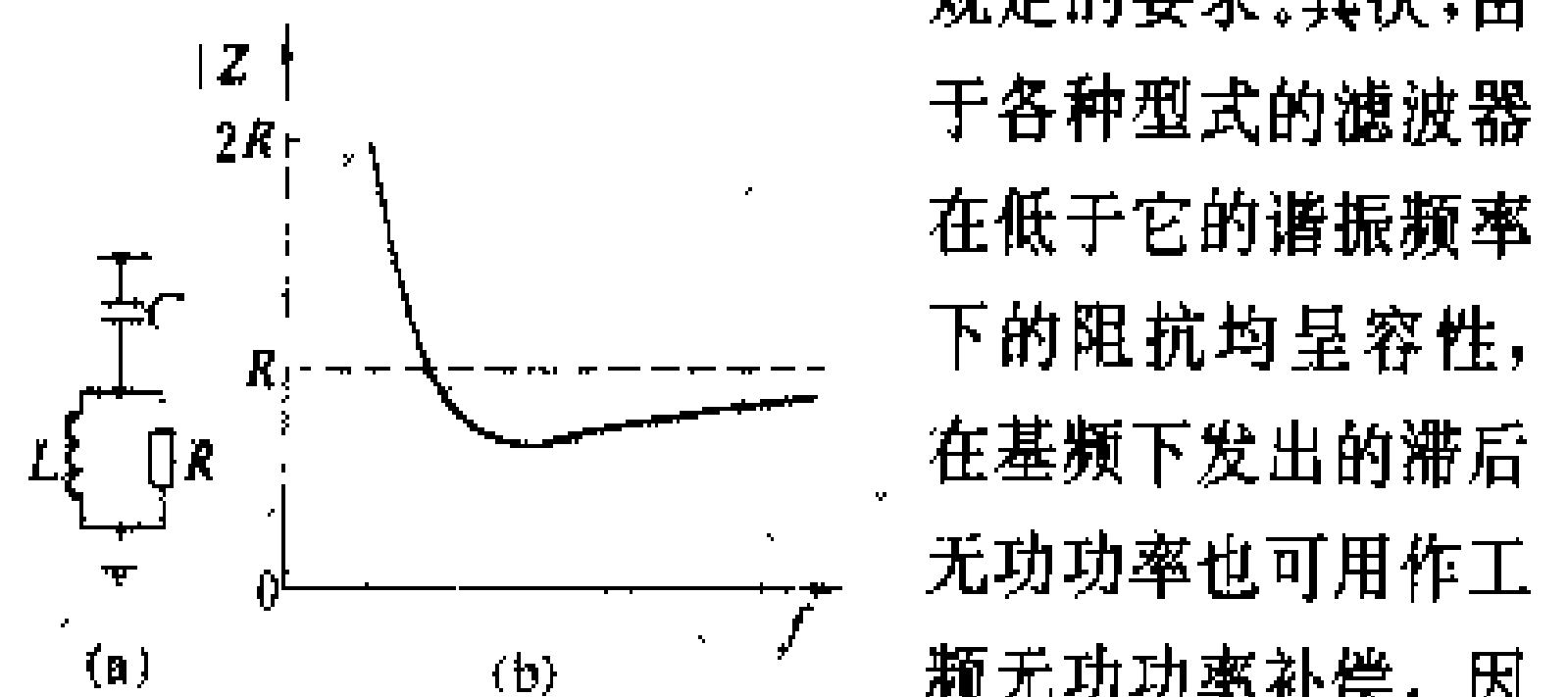


图 3 二阶高通滤波器 (a) 电路；(b) 频率-阻抗特性

合，从而满足换流站无功功率的需求。还应该注意避免交流系统和滤波器及并联补偿电容器在低次谐波（主要是 3 次谐波）频率下产生并联谐振，因为在低次谐波频率下交流系统的等值阻抗通常呈感性。在上述前提下，适当选择滤波器的组成、型式、容量和参数，使包括电能损耗的总费用最小。

在考虑满足滤波要求时，还应该注意因交流系统频率偏移和滤波器元件由于老化、温度变化和制造、调整过程中所造成的参数误差，而使实际调谐频率偏离相应谐波频率的给定值，即所谓失谐。应保证实际可能较长期出现的最不利失谐时仍能满足抑制谐波的要求。这一点对调谐型低次大谐波分量滤波器来说尤为重要。为了能适应季节气温变化进行适当调节，以尽量减小失谐度，在一些直流输电工程中采用有分接头的可调电抗器或可改变接线以改变参数的滤波电容器组。

在实际运行中，除了特征谐波之外，不可避免要出现一些非特征谐波。如果整个滤波装置(或其中的一部分)的频率-阻抗特性，在某一个非特征谐波频率上出现很大的阻抗，也应采取措施适当降低。

交流滤波装置大多直接接在换流站的交流母线上，有的接在换流变压器可连接滤波器的电压较低的第三绕组上。后一接线方式虽然可以降低滤波装置的电压和费用，但调试不方便，滤波效果较差一些，换流变压器的投资也将增加。

为了适应直流输电系统在各种运行方式下滤波及无功补偿的需要，交流滤波装置常分成若干组以便切换，进行调节。为了减小设备费用、占地面积、基波电能损耗和改善瞬态响应，滤波器也有新的发展，例如：减小基波损耗的 C 型滤波器，具有高通并滤去一个或两个特征谐波的三阶高通滤波器等。

(夏道止)

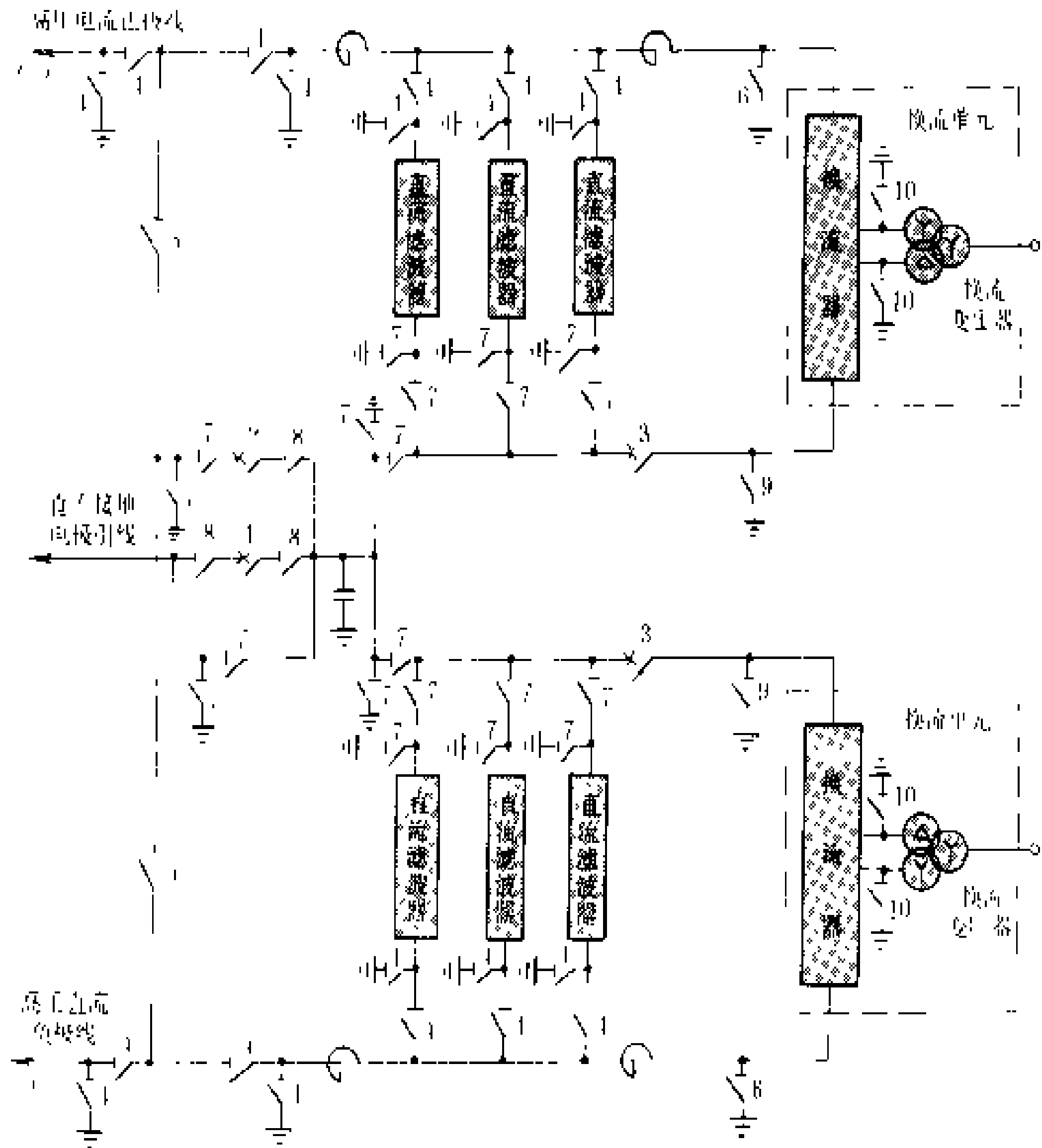
huanliuzhan kaiguan shebei

**换流站开关设备** (switching facilities in convertor station) 能按照运行要求将换流站的设备及直流线路接通和切断的装置。换流站开关设备分为交流和直流开关设备两大类。换流站内的交流开关设备与交流变电所中的开关设备基本一样。

直流开关设备包括直流断路器、直流隔离开关和直流接地开关等，它与交流开关设备相比，主要区别在于：①直流断路器灭弧能力强，能够切断或转移直流电流；②开关触头材料能耐受直流电化学腐蚀；③绝缘结构的外绝缘爬距较大，并且采取措施防止瓷件由于结合金属件或钢脚刚露出粘合剂的一圈受直流电腐蚀形

成的锈层增厚而胀裂。

对于两端直流输电系统，整流站的换流阀本身就



典型双极换流站直流开关设备的配置图

1—金属回路转换断路器 (MRTB)；2—金属回路转换开关 (MRTS)；3—低压直流高速开关 (LVHS)；4—高压直流隔离开关 (带接地刀闸)；5—高压直流隔离开关；6—高压直流接地开关；7—低压直流隔离开关 (带接地刀闸)；8—低压直流隔离开关；9—低压直流接地开关；10—高压直流或交流接地开关

起到直流断路器的作用，它可以断开正常运行电流和故障电流，因此也可不需要另外装设直流断路器。但为了在运行中改变直流回路的接线方式和切断部分故障电流，一般在换流站内装设三种直流断路器：①金属回路转换断路器 (MRTB)，用于从大地回流方式向金属回流方式的转换；②金属回路转换开关 (MRTS)，用于从金属回流方式向大地回流方式的转换；③低压直流高速开关 (LVHS)，用于切断换流站内部直流侧低压部分发生接地故障时的接地电流。对于多端直流输电系统，有时则需要装设直流断路器来切断故障电流，而且将故障部分加以隔离使其退出工作。

直流隔离开关是在无电流情况下进行电路的分断或接通的开关设备。直流接地刀闸是为了安全的目的，在无电压的情况下将某部分电路接地或断开接地的开关设备。

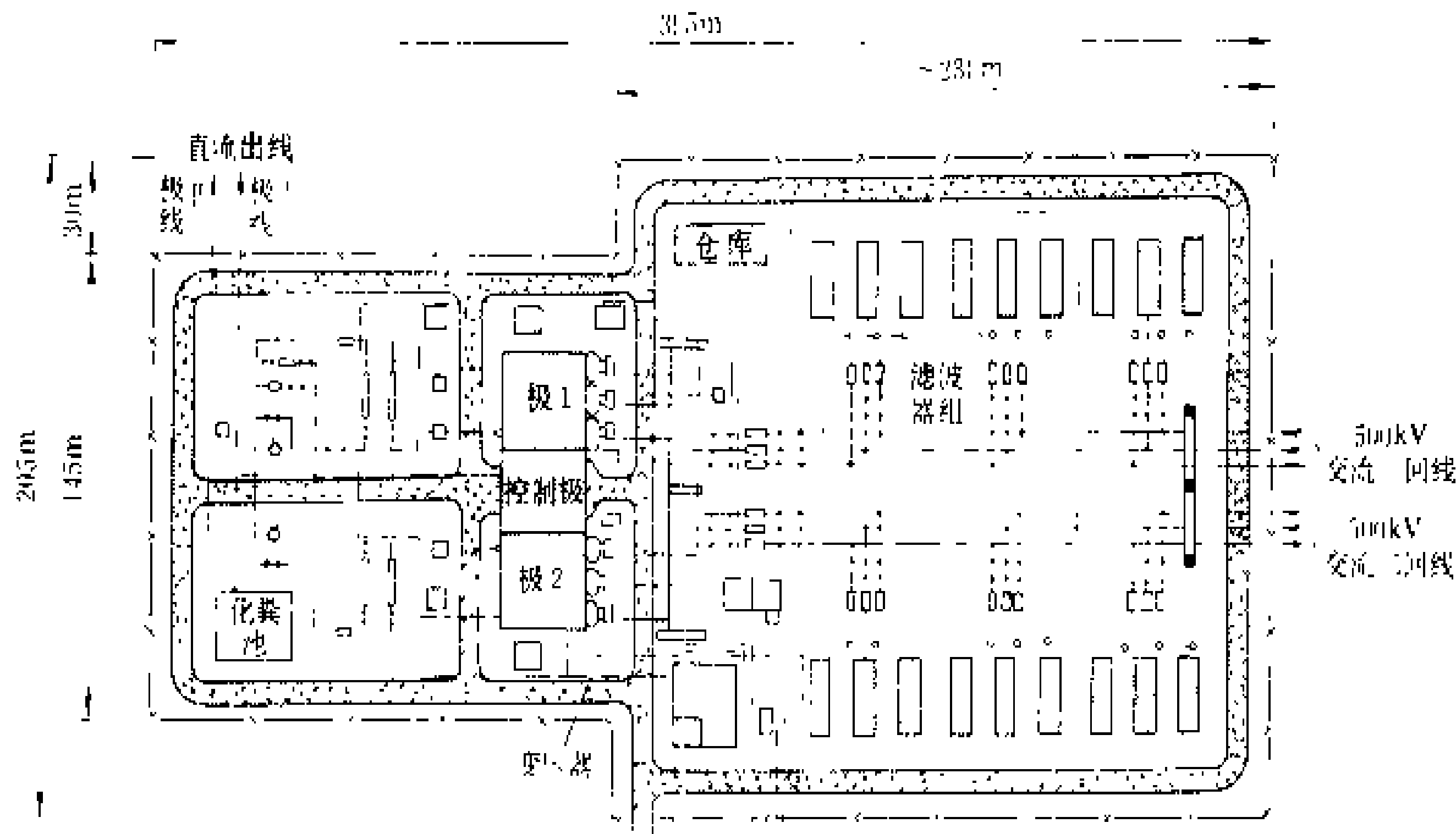
如图所示为典型两端双极换流站直流开关设备的配置图。

参见彩图插页第 36 页 111 图。

(鲍敏铎)

huanliuzhan pingmian buzhi

**换流站平面布置** (layout of convertor station) 换流站内各种设备及其连接线、进出线、建筑、户外设备场地、工程设施与交通道路的总体布置。换流站的主要设备和设施有：换流器、换流变压器、平波电抗器、直流滤波器、交流滤波器、无功功率补偿设备、控制与保护设备、通信设施、交直流配电装置、交直流过电压保护装置以及站用电系统。此外，尚有换流阀冷却系统以及维修、办公和卫生设施等。所有这些设备和设施分别设置或安装在阀厅、主控制室、户外设备场、修理车间、办公室、道路和生活区建筑中。换流站平面布置要满足运行、维修、运输、环境保护以及生活等需要，根据生产的具体情况，并考虑降低造价等因素，因地制宜进行安排。要尽可能减小对于阀触发的电磁干扰和阀换相对外界无线电的干扰等。如图所示为双极换流站的平面布置示意图。



双极换流站的平面布置示意图

为了减小换流阀触发系统可能受到的电磁干扰，须尽可能地缩短阀触发系统的电缆或改用光缆。阀厅与主控制室之间距离应尽量短，这对巡视检查也方便。双极系统一般将两个阀厅分别布置在主控制室的两侧。

为了减小换流阀在周期性通断过程中产生的高频电磁振荡对无线电的干扰，除了对阀厅采取屏蔽措施外，常将换流变压器与平波电抗器的阀侧瓷套管设计成水平型，伸进阀厅中，以节省阀厅穿墙套管，并改善了瓷套管的工作环境，同时避免阀厅无线电干扰波沿交直流引出线向外辐射。

阀冷却介质的制备装置一般布置在阀厅下层或附近，以使冷却介质的温度接近阀厅空气温度，从而防止阀中冷却管道表面结露。

在换流站平面布置中，占地最大的是交流滤波器和无功补偿用的电力电容器，约占全换流站面积的 1/3。为了节省用地，研究滤波装置的紧凑布置(例如封闭式滤波器)是一项重要课题。

采用大容量晶闸管阀的换流站，单位容量占地面积已缩小到 15~20 m<sup>2</sup>/MW，如果采用六氟化硫气体作为绝缘介质，可进一步缩小到 8 m<sup>2</sup>/MW。

参见彩图插页第 37 页 116 图。

(郑德明)

huanliuzhan wugong gonglu buchang shebei

**换流站无功功率补偿设备** (reactive power compensator in convertor station) 装设在换流站中用以提供运行时所需的无功功率的设备。它首先要补偿换流器在运行中所需的无功功率，补偿量约为直流输送有功功率的 40%~60%。由于换流器运

行的触发角不同，一般整流侧需要的补偿量比逆变侧要少一些。有时，换流站的无功补偿装置还担负着一部分负荷所需的无功功率，参与受端交流系统的无功功率平衡。同时，也要考虑到它对换流站交流母线电压水平和电压稳定性的影响，特别是在受端为弱交流系统的情况下。通常采用的无功补偿设备有：静电电容器组(包括交

流滤波电容器组和无功功率补偿的并联电容器组)、同步调相机以及静止补偿装置等。这些设备的构造和工作原理与交流系统所采用的基本相同，但在换流站回路中存在有谐波和直流电压或电流分量，可能招致设备局部过热，外绝缘积秽以及油、纸两相绝缘在暂态过程中油绝缘受到过电压等问题。

**设备调节性能** 无功功率补偿设备的调节性能将影响到交流母线电压的调节效果和稳定性。同时，也要根据其调节性能来考虑无功功率补偿设备的配置原则。

**静电电容器组** 其无功-电压调节性能较差。当换流站母线电压下降时，换流器所需的无功功率增加，而电容器组所提供的无功功率随着电压的下降按电压的平方成比例地降低。在弱交流系统中，无功功率潮流对

电压波动非常敏感,在一定的条件下,恶性循环将引起电压不稳定。采用电容器补偿无功功率,投资省,运行维护简单,所以在换流站交流母线的电压稳定性许可的情况下,都倾向于采用电容器。

**同步调相机** 利用调相机的自动励磁调节装置,在过励磁运行时,它向系统供给滞后的无功功率,在欠励磁运行时,则从系统吸取无功功率。它能平滑地调节电压。如果调相机装有快速的自动励磁调节装置及强行励磁装置,可有效地提高电压的稳定性。但投资较大,运行维护复杂。

**静止补偿装置** 它是由可控的电抗器和可投切的电容器组成,对系统能发出或吸收无功功率,调节速度快且平滑,具有与同步调相机相当的性能,并且损耗小,投资略省,维护简单。目前在高压直流输电工程的换流站中已有采用。

**配置原则** 合理配置换流站中无功功率补偿设备,要根据换流站所连接的交流系统的强弱,优化选择技术经济性能好的方案。交流系统的强弱是指换流站系统侧母线的短路功率相对于直流额定输送功率的比值而言,可用短路比(SCR)来表征。短路比越大,系统等值电抗越小,所连接的交流系统越强;反之,则交流系统较弱。一般认为短路比大于5的系统属于强系统,小于3的为弱系统。

根据一些实际工程计算,逆变站无功功率补偿设备的典型配置原则为:①当 $SCR > 5$ 时,可以全部采用电容器;②当 $5 > SCR > 3$ 时,电容器只能占总补偿容量的50%左右,其余应装同步调相机或静止补偿装置;③当 $SCR < 3$ 时,补偿容量的50%~70%应装同步调相机,同时需备有快速的自动励磁调节装置或静止补偿装置。

如果采用静止补偿装置,则当 $SCR > 2$ 时,就不需装设同步调相机;当 $SCR < 2$ 时,需装设一定容量的同步调相机以增大系统的短路容量,使相应的短路比增大到2以上,然后按逆变站所需的无功功率容量,加装静止补偿装置。

**无功补偿设备试验** 换流站中的静电电容器、同步调相机、静止补偿装置的试验与交流系统中无功补偿装置的基本相同。(见并联电容器试验、同步调相机试验、静止补偿装置试验)

**发展动向** 为了解决换流器所需的无功功率补偿问题,各国已进行了不少的试验研究工作,提出一种人工换相的方法。人工换相是利用附加的接线和设备,把一定波形的附加电压叠加到原来的正弦交流换相电压上去,人为地使整流器在触发角 $\alpha \leq 0^\circ$ 时,换相电压中有一段适当时间为正值以保证相应换流阀的触发和导通。如果是逆变器,同样可使触发角 $\alpha \geq 180^\circ$ 的情况下,

借助于换相电压的叠加部分能实现相应换流阀的触发、导通、换相、关断和阻断能力的完全恢复。因此,可减少换流器吸收的无功功率,甚至还可向交流系统发送无功功率。实现人工换相的方案较多,但到20世纪90年代止都还处于研究阶段。例如采用在换流器交流侧串联电容器的方案,对串联电容器的过电压以及逆变器换相失败时恢复正常运行等问题,都尚待解决;又如采用在换流母线正弦交流电压上附加三次谐波电压的方案,在经济上要增加附加设备的投资,在技术上尚需解决附加电路上某些元件参数随着运行情况变化的跟踪调节问题等。因此这些方案都尚未得到实际应用。

(沈贇坝)

huanliuzhan zhiliu lubo zhuangzhi

**换流站直流滤波装置** (DC harmonic filters in convertor station)

安装在换流站直流侧,与平波电抗器配合用以疏导和抑制直流侧谐波电压、电流的装置,简称直流滤波器。直流侧谐波次数也以交流侧工频基波为准。直流滤波装置的形式与交流滤波装置基本相同,通常采用谐振于低次特征谐波频率的单调谐滤波器、高通滤波器及其组合。它们连接在每一个极与中性点母线之间。它与换流站交流滤波装置主要不同在于:交流滤波装置中有较大的基波电流,而直流滤波装置中无直流电流。

对直流滤波装置的主要要求是抑制直流线路上的谐波电压和电流,以满足减少对音频信道干扰的要求。平波电抗器与直流滤波装置配合,对直流侧的谐波才有明显的抑制效果。平波电抗器的电感量愈大,滤波效果愈好。但平波电抗器的电感值受其它因素的制约,也不宜过大。在单靠平波电抗器不满足谐波抑制的要求时,则需装设直流滤波装置。在背靠背直流耦合系统中采用直流电缆线路时,无需设置直流滤波装置。

直流滤波装置的设计,需要考虑调谐滤波器的失谐以及换流站和直流线路的各种实际运行方式,取实际运行中可能采取的最严重的情况作为设计条件。直流滤波装置设计主要考虑滤波要求和经济性。

参见彩图插页第36页112图。

(夏道止)

huanliuzhan zhujixian

**换流站主接线** (main circuit diagram of convertor station)

直流输电换流站内一次主设备、交直流进出线、接地电极引线等与母线间的接线方式。换流站主接线图一般采用单线图。换流站内一次主设备包括:换流器及其控制检测装置、换流变压器、平

波电抗器、交直流两侧谐波滤波器、交直流断路器、交直流隔离开关、旁路开关、接地开关、交直流各种互感器以及各种避雷器等。换流站内各主设备与各主要工程设施间的接线方式取决于各主要设备的功能、技术规范 and 运行要求。直流输电在各种不同运行方式下,换流器与直流线路和接地极间要采取不同的接线方式。

### 各种直流输电制式的站内主接线

**正常运行方式下的主接线** 在直流输电系统中,换流站主接线与直流线路(含回流电路)的构成方式是密切相关的。绝大多数的直流输电工程均采用双极方式,即在正常时是双极运行的。交流电自整流侧交流系统经换流变压器和换流器整流成直流电后输出,通过平波电抗器和直流线路送至逆变侧,在逆变站再经过平波电抗器,由换流器逆变成交流电,经换流变压器送入逆变侧交流系统。由于两极的直流电流在大地回流电路中方向相反,相互抵消,所以在双极对称运行时流经接地极的电流只是很小的不平衡电流(约为额定电流的百分之几)。以两端双极直流输电为例,直流线路的基本构成方式有三种:①双极两线一地制,用大地(或海水)做回流电路;②双极三线制,用金属导线做回流电路;③双极二线制,无回流电路。

换流站直流侧所装的各种开关设备供多种模式的事故运行方式切换操作之用。两端的直流中性点通过较长的接地极引线和接地极相连。交流滤波器接在换流站交流母线上,直流滤波器跨接在极线和中性线间。两极的中性线上还有低压高速开关,用来清除站内接地故障。在正常运行时,站内主接线中接近地电位的部分一点接地,整个输电系统仍可工作,但有电流流过接地点,其数值虽小,却会使换流站内及附近的设置在地面上和埋在地下的金属物体受到腐蚀。因此通过中性线差动保护检出后,闭锁故障极,系统转为单极运行。为消除这种接地故障,同时把低压高速开关断开,切断这部分从大地回流电路中分出来不流经接地极的电流,使它回到原来的回流电路中去。

**事故运行方式下的主接线** 双极直流输电的优点之一是:如果一个极的晶闸管阀或换流变压器损坏或需要检修时,可切去故障部分,利用余下的原有接线,仍可输送一半或一半以上的功率。这时有三种可供选择的运行方式:单极大地回路方式、单极金属回路方式和单极双导线并联大地回路方式。

**单极大地回路方式** 用健全极输电线路的导线为极导线,并以大地为回流电路的运行方式。形成这种方式最为简单,不需任何倒闸操作,当一极故障退出后,故障极的直流电流为零,健全极的电流则自动经大地

回路返回,形成单极大地回路方式。考虑到大地回路的地中电流会使地下或地面埋设物受到腐蚀,对通信线干扰也将增大,并且在中性点直接接地的变压器和相应的超高压线路所组成的电力网中有直流电流通过,产生铁芯的直流偏磁等,如需长时间运行时,一般均转换成单极金属回路方式运行。

**单极金属回路方式** 用健全极的输电线路导线为极线,并以故障极的线路导线为回流电路的运行方式。形成这种方式需要一定的倒闸操作步骤。当故障消除后,如需要恢复双极运行时,则首先从单极金属回路方式转为单极大地回路方式,然后再重新启动故障极。

**单极双导线并联大地回路方式** 用两个极的导线并联作为极线,并以大地作回流电路的运行方式。这种方式从本质上来说与单极大地回路方式一样,但因两个极的导线并联,其电阻减少一半,在运行中其能量损耗也相应降低,约为单极大地回路方式的1/2,为单极金属回路方式的1/4。形成这种运行方式需要一定的倒闸操作步骤。

### 换流站主要设备的接线

**换流器** 由多个晶闸管元件串联组成换流阀,每六个阀接成一个三相换流桥,每两个桥和两个相差30°基波相角的换流变压器绕组以及相应的开关设备能组成一个十二脉动的换流器,也称基本换流单元。换流站接线中一个主要问题是每一个极究竟采用几个基本换流单元。采用两个较低电压的换流单元,则比采用一个较高电压的换流单元需更多的换流变压器及辅助设备,因此投资增加。但是两个基本单元其中之一损坏时,极功率仅丧失一半,如只采用一个基本换流单元,一旦损坏,将丧失整个极的功率。这个问题的最终决定,取决于具体的系统情况,例如系统有多少旋转备用容量,极功率的丧失对频率的影响如何,频率减少多少时才允许切负荷等等,同时也取决于健全极中换流阀的过负荷能力。总之,如果一个基本换流单元故障,它的功率损失能得到补偿或系统能耐受其功率损失的冲击影响,则用较少基本换流单元是有利的。

**换流变压器** 如选用三相变压器,其外部接线比较简单。若采用单相变压器,其外部接线就比较复杂。但三相变压器体积大,运输困难,须再设一台备用,费用较高。所以实际工程中大多采用单相变压器。对于十二脉动换流器,其上下部换流桥的换流变压器需提供换相电压的相位应相差30°。如采用三绕组变压器,则将两组三相二次绕组分别接成Y形和△形。

**交流滤波器** 一般都接在交流母线上。为了避免投切时引起交流母线的电压变化过大,也为了操作方便和运行安全,交流滤波器需分组,再由1~2个总开



联接至换流站交流母线。分组的原则是：①投、切单纯的电容器分组，交流母线电压的变化应不超过2%；②投、切带有电容器的滤波器分组，母线电压变化不超过3%；③投、切整组滤波器时，母线电压变化应不超过5%。另外一个问题是滤波器的内部接线，究竟采用单调谐滤波器还是采用高通滤波器，或是二者结合使用。当前的一种趋势是全部采用高通滤波器，可节省占地面积，也能增加接线的灵活性。（见换流站交流滤波装置）

**避雷器** 以前曾使用有间隙碳化硅避雷器，目前广泛采用无间隙的金属氧化物避雷器，降低了电气设备的绝缘水平，节省了设备费用。（见换流站避雷器）  
（林永生 赵礼生）

huanxiang

**换相**（commutation） 换流器在运行时，借助于换流阀的开通和关断使流经换流器电流从一个电流路径转移到另一个电流路径的物理过程。

如图1和图2所示，单桥整流器由6个晶闸管阀组成，标号1~6为正常运行的触发开通顺序。对直流输电而言，换相是借晶闸管阀的开通和关断，把换流桥直流侧的一个端子（m或n）从交流端三相中的一相换接到另一相的过程。

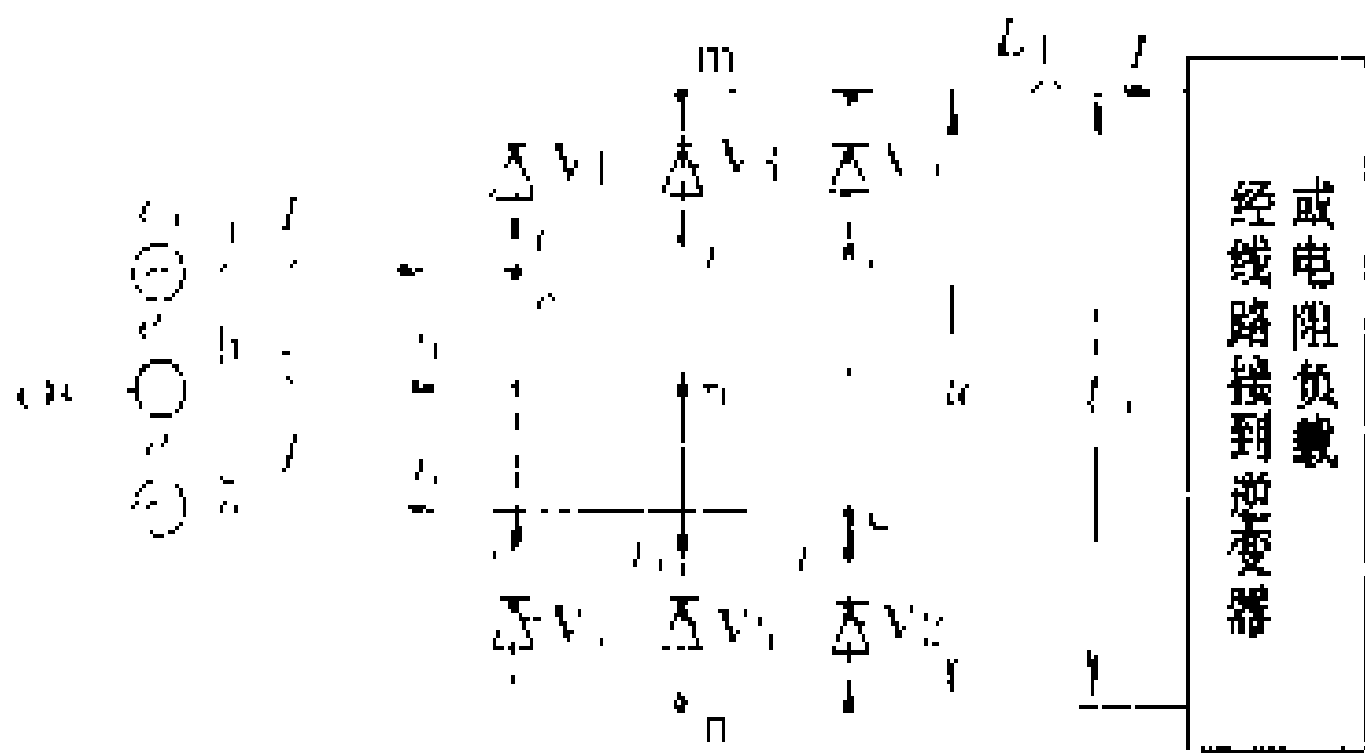


图1 单桥整流器电路

由于换流变压器有漏感，换流阀回路中也有电感，有时还要计及交流系统和电源的等效电感，因而换相过程需经一段时间才能完成。在换相过程中，参与换相的两个阀都有电流。进入导通阀（例如V1）的电流从零增大到直流电流 $I_d$ ；退出导通阀（例如V5）的电流从直流电流 $I_d$ 减小到零而关断。两个换相阀中的电流之和仍为 $I_d$ 。

**整流器换相过程** 先阐述理想换相的条件，再从换相前、触发时、换相期间、换相参数和变量等方面分析。

**理想换相的条件** ①三相交流电源的电动势是对称的正弦波，而且频率恒定；②交流电力网的三相阻抗是线性而且对称的，换流变压器的励磁导纳忽略不计；③直流侧平波电抗器具有很大的电感，因而直流侧电

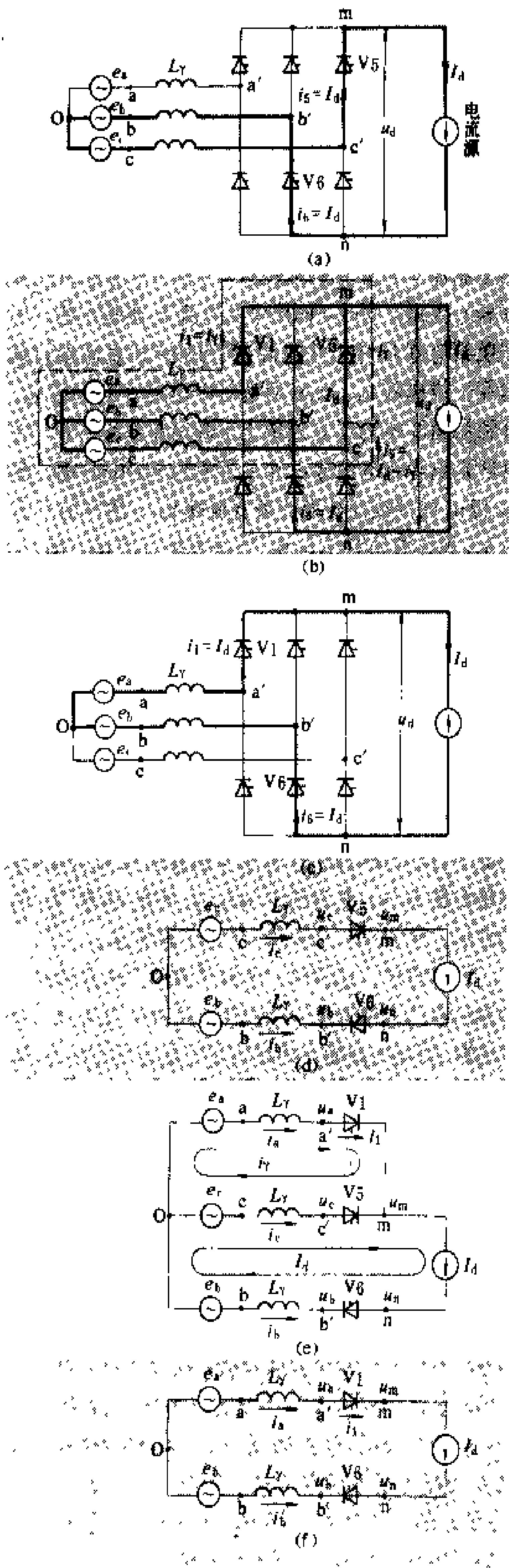


图2 整流器在阀V5向阀V1换相的实际导通电路及等值电路

(a) 阀V5、V6导通时；(b) 阀V5和V1换相时；(c) 阀V6、V1导通时；(d)、(e)、(f) 分别为(a)、(b)、(c)的等值电路

流可以认为是平直的,没有纹波;④换流阀的特性是理想的,即通态正向压降和断态漏电流均小到可以忽略不计;⑤6个桥阀以1/6周期的等间隔依次轮流触发。

**换相前的工作状态** 在上述理想条件下换相过程的分析,可以从阀V5和V6导通其余各阀阻断的状态开始,如图2所示。这时整流器实际导通的电路如图2(a)中的粗线所示,其等值电路如图2(d)所示。桥的交流端c'和b'分别通过阀V5和V6与桥的直流端m和n连通。同时,回路中的电流 $I_d$ 是恒定的,不会在换相电感 $L_r$ 中产生压降。因而加到桥直流端的电压就等于线电压 $u_{bc}$ 。m、n两端对中性点O的电压 $u_m$ 、 $u_n$ 分别如图3(a)C1点左侧上下两段粗曲线所示,它们显然是电源相电动势 $e_c$ 和 $e_b$ 正弦波形中的一段。曲线 $u_m$ 和 $u_n$ 间的纵向长度代表直流端m、n之间的直流电压 $u_d$ ,其波形如图3(b)中C1点左侧一段粗曲线所示,即电源线电动势 $e_c$ 正弦波形中的一段。

**触发** 如果在此C1点滞后一个(不大于 $90^\circ$ )相位角 $\alpha$ 的p1时刻对阀V1控制极加上触发脉冲p1,如果此时阀V1的电压是正的,一经触发,阀V1就在p1时刻开通。如果V1上的电压不是正的,则V1不会开通,在p1之后,若触发脉冲仍持续加于阀的控制极,一当阀电压变为正的,阀即开通,此时刻记为T1。在此情况下,阀开通时刻T1滞后于触发时刻p1。实际导通电路由图2(a)变为图2(b)。从只有V5和V6两个阀导通,变为V5、V6和V1三个阀导通。

**换相期间** 在任何一个阀开通或关断的瞬间,等值换流器的电路就从一个线性电路改变成为另一个线性电路。但其中储能元件的状态变量总是连续的,通过电感的电流不会突变。因此,在这瞬间之后的另一个电路中的任一电感支路电流的初值,应等于这瞬间之前的电路中的同一支路电流的终值。当平波电感 $L_d$ 足够大时,可以认为直流电流 $I_d$ 基本保持不变。在阀V1开通的前瞬间, $I_d$ 从O点流经 $e_c \rightarrow c \rightarrow L_r \rightarrow c' \rightarrow V5$ 到m点;在阀V1开通瞬间,在中性点O和母线m之间同时存在着 $O \rightarrow e_c \rightarrow c \rightarrow L_r \rightarrow c' \rightarrow V5 \rightarrow m$ 和 $O \rightarrow e_a \rightarrow a \rightarrow L_r \rightarrow a' \rightarrow V1 \rightarrow m$ 两个并联电路,如图2(e)所示。因为这时 $e_a > e_c$ ,所以 $I_d$ 必然从含有阀V5的路径转移到后一条包含有阀V1的路径。由于电路中有电感存在,电流转移不可能瞬时完成,要有一个过程。如图2(e)所示的线性电路中,在阀V1开通后等值电路中的下面回路电流为 $I_d$ ,上面回路电流记为 $i_r$ 。 $i_r$ 实际上是阀V1和V5同时导通时在c'a'处造成两相短路的短路电流。

以阀V1为例,它的电流 $i_1$ 在换相过程将从零开始增大,如图4所示。与电流 $i_1$ 逐渐增大的同时, $i_5$ 逐渐减小。当 $\omega t = \alpha + \gamma$ 换相结束时, $i_1 = I_d$ ,而 $i_5 = 0$ ,阀

V5关断;换流器电路又从三个阀导通状态转成两个阀导通状态,如图2(c)所示。在阀V5关断之后,其阴极通过导通的阀V1连到a点,所以它的阴极电位 $e_c$

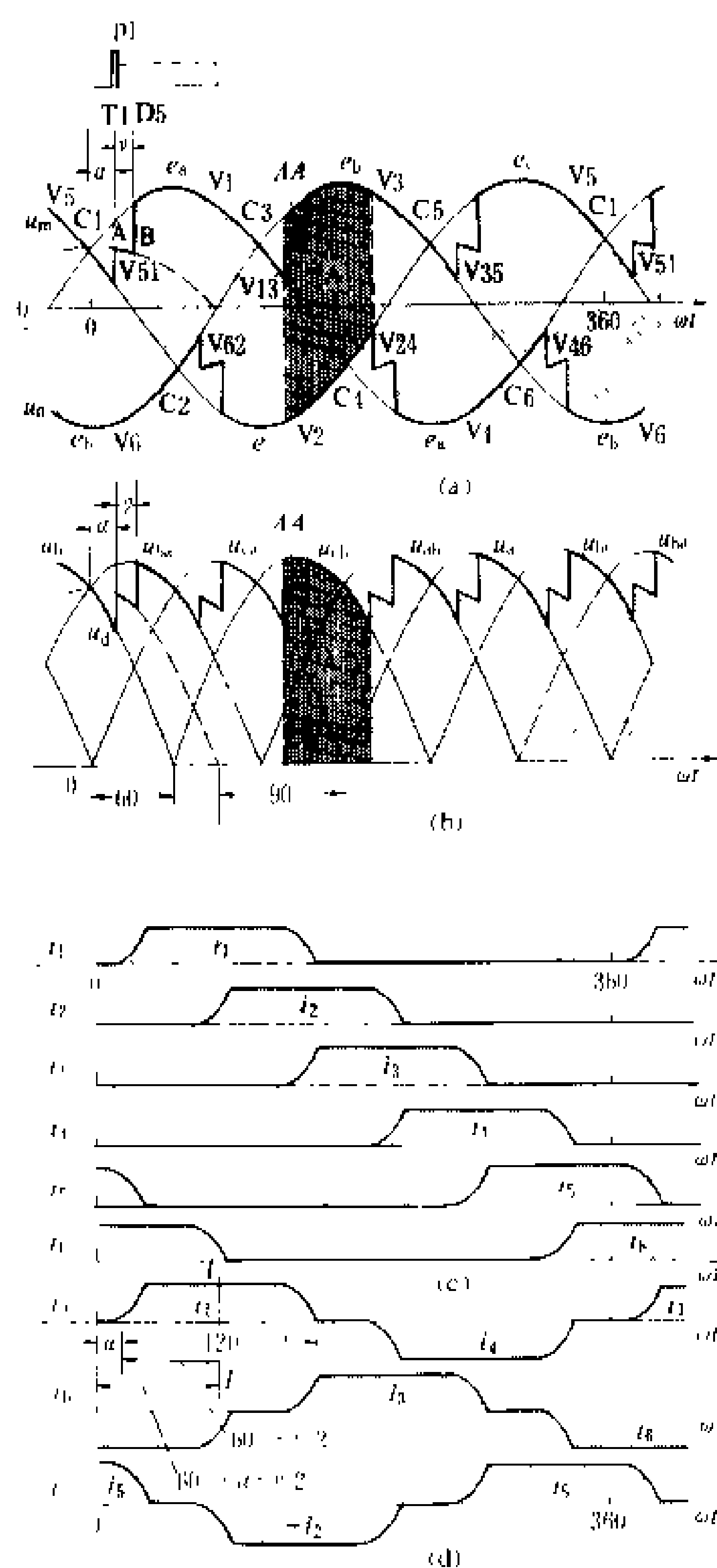


图3 整流器的电压和电流波形  
(a) 直流端m、n对中性点的电压波形;(b) 直流电压 $u_d$ 的波形;(c) 阀电流波形;(d) 交流电流波形

比阳极电位 $e_c$ 高,阀V5电压是反向的,从而保证阀V5可靠地关断,其电流过零的关断时刻用D5来表示,D5也简称关断时刻。余类推。从阀V1开通瞬间T1到阀V5关断瞬间D5,直流电流 $I_d$ 从c相流经阀V5转移到从a相流经阀V1的过程称为换相过程,相应的时间称为换相期间。它的历时长短用相位角 $\gamma$ 表示时,称为换相角。对于阀V1,由 $\omega t = \alpha + \gamma$ 到 $\omega t = 120^\circ + \alpha$ 期间和 $\omega t = 120^\circ + \alpha + \gamma$ 到 $\omega t = 360^\circ + \alpha$ 期间为非换相期间。在等间隔脉冲触发下,阀V2将在 $\omega t = 60^\circ + \alpha$ 瞬间开通,阀V6开始向阀V2的换相。后继各阀也依次换相,周而复始。

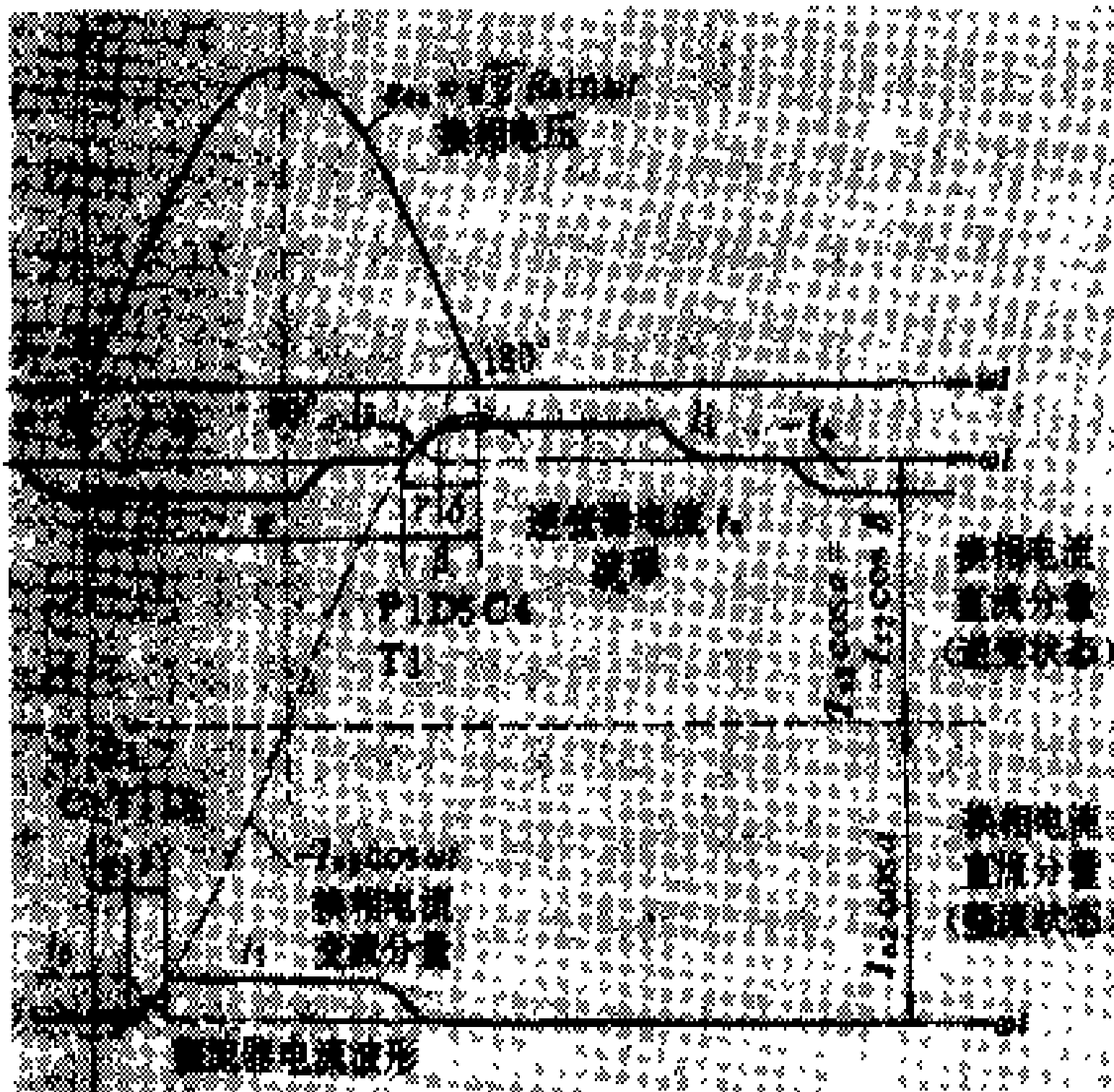


图 4 换流器的换相过程

**换相参数和变量** 直流输电换流器的换相一般借助于交流电力网提供的短路电流来实现，也称之为电网换相或有源换相。电流  $i_r$  称为换相电流。提供换相电流的交流电压称为换相电压。在换相期间，换相电流在换相电抗  $X_r = \omega L_r$  中产生的并折算到直流侧的电压降  $\Delta U = 3X_r I_d / \pi = d_r I_d$  称为换相压降，其中  $d_r$  称为比换相压降，它表示一个单位直流电流在换相过程中所引起的直流侧压降。 $X_r = \omega L_r$  称为换相电抗。

在实际工程的分析计算中，当有正确设计的交流谐波滤波装置时，如果滤波装置接入点的电压谐波含量符合要求，则可认为是正弦电压时，此滤波节点（也称为直流节点）的电压可作为换相电压。一般此滤波节点选在换流站的交流母线上。换相电抗是滤波节点到换流器直流母线间换相电流所流经的每相电抗，主要包括换流变压器漏抗和阀电抗。

如果换流器与交流电源间没有滤波装置，一般取同步电机或系统的等效暂态电动势或次暂态电动势作为换相电压，并取相应的系统等效电抗、换流变压器漏抗和阀电抗之和作为换相电抗。在换流装置开通和关断时，直接对同步电机造成扰动的情况下，则采用次暂态电抗和相应的电动势参与计算。当换相角  $\gamma$  小于  $60^\circ$  时， $\gamma$  角可按下式计算：

$$\gamma = -\alpha + \arccos \left( \cos \alpha - \frac{2X_r I_d}{\sqrt{2} E} \right)$$

**逆变器换相过程** 逆变器的工作原理见换流器中的逆变原理。图 5 给出逆变器的电压波形，图 4 中部表明逆变器换相过程的电流波形。

直流输电逆变器的换相及其过程与整流器相类似，也是靠逆变器所连接的交流系统提供换相电压和换相电流来实现的。在阀 V5 和 V1 换相结束时，阀 V5 关断时刻 D5 到线电压过零点 C4 之间的相角  $\delta_s$ ，称为阀 V5 的关断角，而且  $\beta_1 = \gamma_{s1} + \delta_s$ 。当各阀的运行角度

$\beta$ 、 $\gamma$  和  $\delta$  相等时，可省去下标号码。关断超前角  $\delta$  要足够大，才能使刚退出导通的换流阀有足够长的时间处于反向电压作用之下，以保证退出导通阀阻断能力

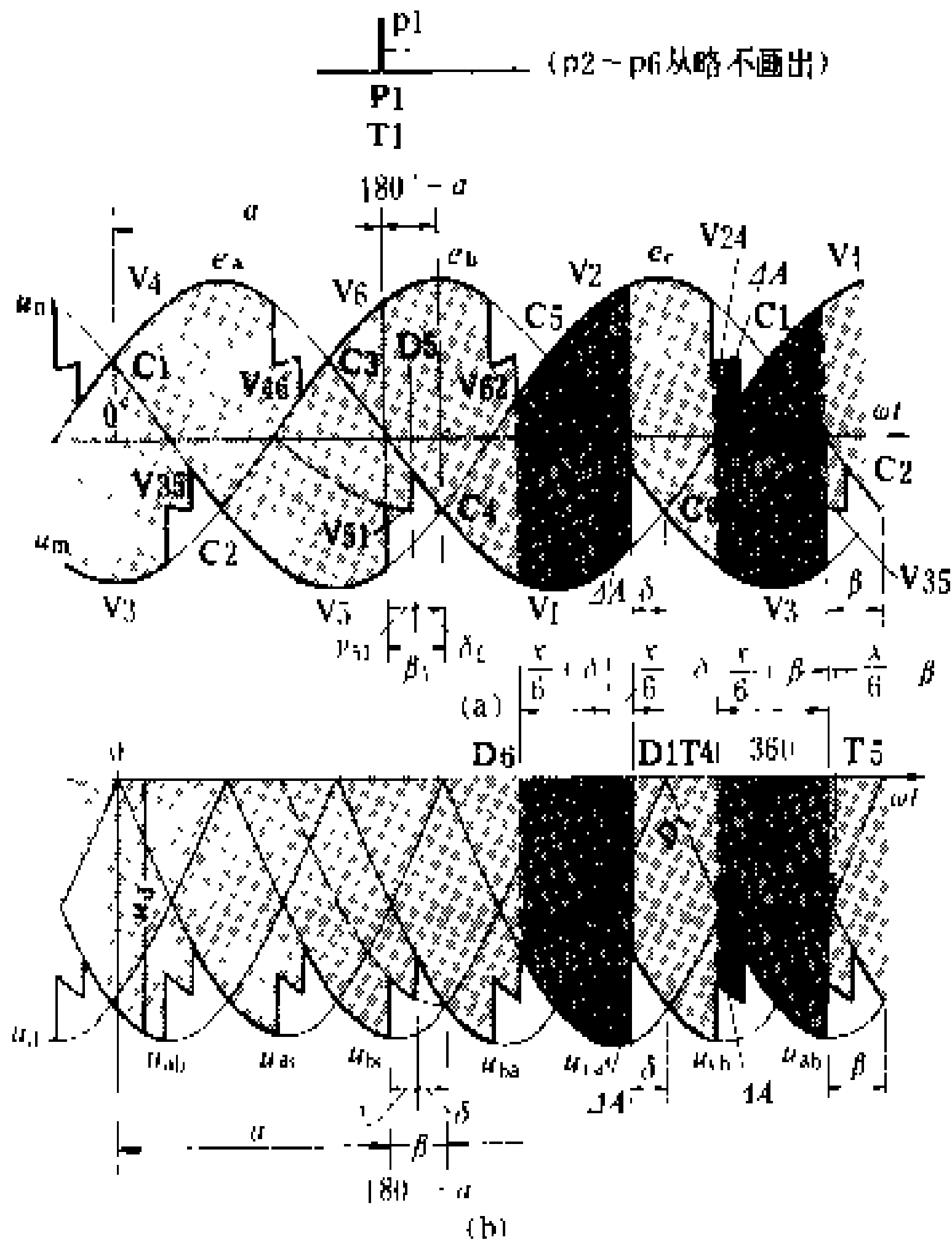


图 5 逆变器的电压波形

(a) 相电压波形；(b) 线电压波形

的完全恢复。当  $\delta$  不够大时，由于在过了 C4 点之后，阀 V5 将又加上正电压，如果阀 V5 的阻断能力尚未完全恢复，则在加正电压时将会再次导通，此时阀 V5 刚刚换相给阀 V1 的电流又倒换相到阀 V5 中来，因而造成故障。这种故障称为换相失败。因此，逆变器在正常运行时，关断角必须大于某一定角度，此角度称为关断余裕角  $\delta_0$ ，其大小为阀恢复阻断能力所需时间再加上若干裕度，一般取  $\delta_0 = 15^\circ \sim 20^\circ$  或更大些。

**人工换相** 利用附加元件和电路，在原有正弦波换相电压上叠加某一定波形的附加电压，保证换流阀在将要触发开通的前瞬间起阀电压为正值，也可使换流阀退出导通开始关断时，特别是逆变器阀开始关断时，还应该紧接着有一段足够长的时间使阀处于反向电压下，以保证阀阻断能力的恢复。随着  $\alpha$  和  $\delta$  的减小，可以减少换流器在运行中的无功功率消耗，甚至可使它工作于  $\alpha < 0^\circ$ （整流器）和  $\alpha > 180^\circ$ （逆变器），从而有可能提供滞后的无功功率。这种换相方式称为人工换相。人工换相技术还处于实验阶段。换流器的起停和某些电容器出现过电压等问题尚有待于进一步解决。

#### 参考书目

黄俊，半导体变流技术，北京：机械工业出版社，

1983

浙江大学发电教研室直流输电科研组. 直流输电. 新一版. 北京: 水利电力出版社, 1985

[瑞典] 乌尔曼著. 直流输电. 张金堂等译. 北京: 科学出版社, 1983

(Uhlmann E. Power Transmission by Direct Current. New York: Heideberg, 1975)

(王德诚)

huliu fangshi

回流方式 (types of DC return circuit)

直流输电系统两端换流站直流侧中性点间的直流回路的构成方式。回流方式可分为陆地回流方式、海水回流方式、金属导线回流方式三种。由于陆地回流方式与海水回流方式性质基本相同, 故也统称大地回流方式。

大地回流方式 以陆地或海水作为直流电流的回路电路, 两端换流站中性点均直接接地。接地电极可设置在陆地上、海岸边或海洋中, 并远离换流站。这种回流方式的主要特点是: ①回流电路的电阻小, 有功损耗小。②对远距离输电工程的建设投资较省。③直流电流流经大地时会引起附近埋在地中和设置在地面上金属设施的腐蚀, 为此应采取保护措施如: 在金属构件表面增加绝缘层, 应用阴极保护或保持与直流输电接地电极间有较远的距离等。④对中性点接地的邻近交流电力系统会产生不良影响。地中直流电流的一部分流经变压器中性点、线路和对侧变压器中性点再到地, 不仅会引起变压器铁芯的不对称饱和, 还可能引起继电保护的误动作。因此, 直流输电接地电极必须与变电所保持一定的距离, 或将变压器中性点通过电阻接地, 以限制大地中直流电流的流入。⑤陆地电极的设计要保证附近地面电压梯度不危及人、畜安全, 海水电极要消除对附近海洋生物的威胁。例如在电极周围设置围栏, 以防人、畜、海洋生物接近电极。⑥直流电流流经大地时,

要防止谐波电流对附近通信线路的干扰。可采取加装直流滤波器或与通信线路保持一定距离的方法来解决。⑦采用海底电缆的直流输电系统, 当以海水作回流电路时, 由于回流电路中的直流电流流散于广大海域, 其磁场不能抵消海底电缆中直流电流所产生的磁场, 从而影响航海船只的磁罗盘读数。当海底电缆走向与地磁场方向一致时, 对磁罗盘的影响最大; 两者垂直时, 对磁罗盘指示的方向没有影响。当船只航行到海底电缆正上方时, 对磁罗盘的影响为最大。随着船只离开海底电缆正上方与海底电缆的水平距离逐渐增大, 海底电缆对磁罗盘的影响迅速减小。

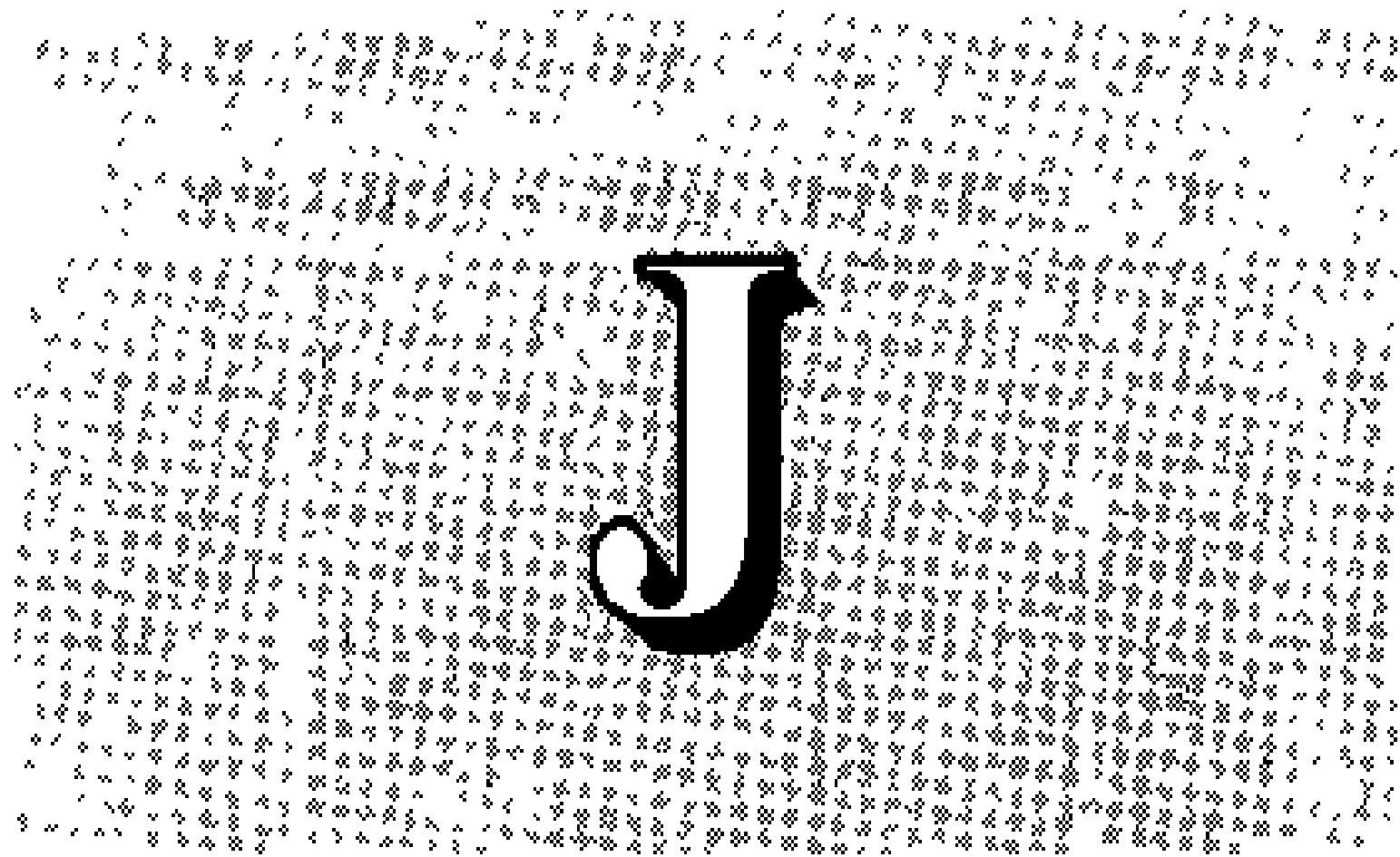
金属导线回流方式 以低绝缘导线作为直流电流的回流电路, 并要求只有一端换流站 (大多为逆变站) 的中性点接地, 以固定直流系统对地的电位, 避免出现对地电位的浮动, 威胁换流站设备和线路绝缘。这种回流方式的主要特点是: ①克服了大地回流方式的缺点, 既不会引起附近地下金属设施的腐蚀, 也不会造成对人、畜及海洋生物的危害。②对远距离输电工程, 其建设投资较高, 而且回流电路的电阻较大, 因而电能损耗也较大。

在双极直流输电系统正常运行时, 通过回流电路的只是为数很小的两极不平衡电流, 即两极的电流差。但当一极发生故障时, 另一健全极的全部电流由回流电路通过, 转为单极方式运行, 以保证连续供电。当双极直流系统需要分期建设时, 可先建成一极采用大地或金属导线回流方式投入运行, 以便实现投资效益。在上述两种情况下, 回流电路均通过一极的全部电流。单极运行通常只作为暂时的过渡方式, 长期运行的实例并不多。一旦另一极检修完毕或建成后, 即转入双极方式运行。

参考书目

Kimbark E W. Direct Current Transmission. New York: Wiley-Interscience, 1971

(王德诚)



jichuan baoxianqi

**击穿保险器** (sparkover protective device)

应用在低压电力网中的保护间隙。使用时直接和被保护的设备并联,用以限制被保护设备上的过电压。击穿保险器通常是密封在瓷套中的一个小间隙,间隙的工频放电电压为 500~800 V(有效值),雷电冲击放电电压不大于 2000 V(峰值)。一般将击穿保险器接在配电变压器低压侧(400 V)绕组的不接地的中性点和地之间,或低压电力网的相线和地之间,用以防止 3~10 kV 高压线路在故障下与低压线路搭接所造成的低压线路的电位升高,保护人身的安全。

(李启盛)

Jianada Pisihe liuyu 500 kV bianliansuo

**加拿大皮斯河流域 500 kV 变电所** (Pisi river valley 500 kV substation of Canada)

20 世纪 70 年代中期,加拿大不列颠哥伦比亚水电局(简称 BC 水电局)为了将皮斯河流域的波提山水电厂装机容量 2270 MW 的电力输送到 1000 多公里的温哥华城市负荷中心,建立了 BC 水电局第一条 500 kV 输电线路,它包括波提山水电厂 500 kV 升压站和威廉斯顿、克雷兰卡、英格多等 3 个 500 kV 降压变电所。这三个 500 kV 变电所的电气设备的选型、配电装置的最小电气距离、间隔宽度、构架尺寸以及配电装置的布置型式都完全相同,而电气主接线分成一个半断路器接线和变压器母线组接线两种类型。以其中的威廉斯顿 500 kV 变电所为例说明 BC 水电局皮斯河流域 500 kV 变电所的特点。

**建设规模** 威廉斯顿 500 kV 变电所是由水电站送出的第一个 500 kV 变电所,除了满足地区负荷之外,还担负着将电力转送至下一个 500 kV 变电所的任务,在系统中的位置十分重要,母线穿越功率也较大。500 kV 10 回出线,230 kV 10 回出线,10 kV 没有出线而是接 10 kV 并联电抗器。500 kV 主变压器共 5 组,每组容量 300 MV·A。500 kV 并联电抗器共 10 组,每组容量 135 Mvar。10 kV 并联电抗器共 5 组,每组

容量 75 Mvar。此外还装有 5 台 75 MV·A 的同步调相机。

**电气主接线** 500 kV 配电装置采用变压器母线组接线,即每回 500 kV 出线都经过 2 台 500 kV 断路器分别接入两组工作母线,而每台 500 kV 主变压器不经过断路器直接接入两组工作母线。它反映了有些国家设计 500 kV 变电所的特点:①认为高压断路器的质量十分可靠,不需要经常停电检修,因此不设检修高压断路器用的旁路母线(中国一般都设置旁路母线)。②认为主变压器的工作十分可靠,故障率很低。因此主变压器可以直接接入母线,不会因为主变压器经常故障造成母线长期停运的情况。

此外,每回 500 kV 出线回路都安装了一组线路隔离开关,当线路停电检修时,打开这组隔离开关,本回路的 2 台断路器仍处于合闸状态,保持两组工作母线之间并联运行。

**高压配电装置** 500 kV 和 220 kV 高压配电装置都采用铝管母线方案。这是加拿大、美国以及欧洲等国家高压配电装置的特点之一。500 kV 配电装置的工作母线和设备之间连接线均采用  $\phi 152.4$  mm 铝合金圆管,分成上下两层布置。上层布置铝管母线,对地距离 14 m,采用高 4 m 的支柱绝缘子支撑起来。下层布置设备之间的连接铝管,对地距离 9.5 m。上下两层铝管方向互相垂直,采用特殊的 A 型支架互相连接。高压配电装置的上方没有架空软导线,布置清晰、美观,节省占地面积。

**控制调度** 在 500 kV 和 220 kV 高压配电装置区域内都单独设置了继电保护屏室,安装各种继电保护装置,因此变电所内只有一个面积较小的集中主控制室,包括控制室和直流电源室等。它是 15 m×15 m 的一幢单层建筑物,结构比较简单。取消了电缆夹层,户外二次回路控制电缆和电力电缆通过中接口柜与户内的二次回路控制设备和动力照明设施相连接。集中主控制室与分布在高压配电装置区域内的各继电保护屏室之间利用远动通道联系。主控制室内安装了一对一弱电玛赛克控制屏,对全所设备进行集中控制。全所还安装了一套微机监控装置以及远动终端装置,具有事故顺序追忆、制表打印、遥信、遥测和遥调等功能。全所只有十几名运行值班人员,人员编制少。具有就地控制功能,同时也可以 500 kV 中心调度所进行遥控,自动化程度较高。

参见彩图插页第 9 页 29 图。

(蓝增玉)

jiakong dixian

**架空地线** (overhead ground wire) 见避

雷线。

jiakong dixian jiemian xuanze

**架空地线截面选择** (cross-section selection of overhead ground wire) 输电线路的架空地线布置在导线的上方，主要作用是防止雷电直击导线、起到屏蔽的作用，并通过杆塔接地，将雷电流引向大地。架空地线遮断先导电场的一部分电力线，降低纵电场强度，使导线上被感应的电荷数量减少；同时，由于架空地线的存在，改变了耦合系数，增大了导线对大地的电容，从而降低了感应雷过电压的幅值。运行经验证明，架空地线能有效地减少输电线路的雷击跳闸次数。

仅作防雷用的架空地线，一般采用多股钢绞线，在逐基杆塔上直接接地。随着高电压、长距离输电技术的发展，为开拓架空地线的综合利用，也有采用高导电性能的良好导体，如钢芯铝绞线、铝包钢绞线和钢芯铝合金绞线等作架空地线的。良好导体的架空地线，除防雷用途外，还具有以下几种功能：①利用它开辟高频载波通道。架空地线在逐基杆塔上通过小间隙接地，在雷云先导阶段间隙自动击穿，不影响防雷效果。②减轻对邻近电信线路的电磁危险影响。当输电线路发生接地短路时，短路电流通过架空地线返回变电所的部分增大，从而对导线短路电流产生的一次磁场的抵消作用增大，使被影响的电信线路上的感应纵电动势降低约40%~60%。③超高压输电线路单相接地短路，分相开断维持非全相运行时，非故障相通过相间互感和相间电容的耦合向开断的故障相潜供电流，良好导体架空地线可使潜供电流减小，促使故障点自动熄弧。④采用良好导体架空地线后，输电线路的零序阻抗减小，接地故障时可降低非故障相上的工频过电压。

架空地线的材料和截面选择，须根据电力系统和输电线路的具体要求，进行方案论证确定。以防雷为主的架空地线，其材料性能和截面选择，一般应满足机械强度和热稳定条件的要求；对于需要综合利用的架空地线，则尚需满足其他功能的要求，作相应条件的验算。

按机械强度条件选择架空地线截面 首先根据防雷的要求，以考虑导、地线在杆塔上的尺寸配合。中国按照SDJ7《电力设备过电压保护设计技术规程》的规定：为防止雷击架空地线档距中央引起反击导线，要求按气温15℃、无风条件，档距中央导线和地线间的距离S满足下列三个公式计算结果中的最小值

$$S_1 \geq 0.012l + 1 \tag{1}$$

$$S_2 \geq 0.1I \tag{2}$$

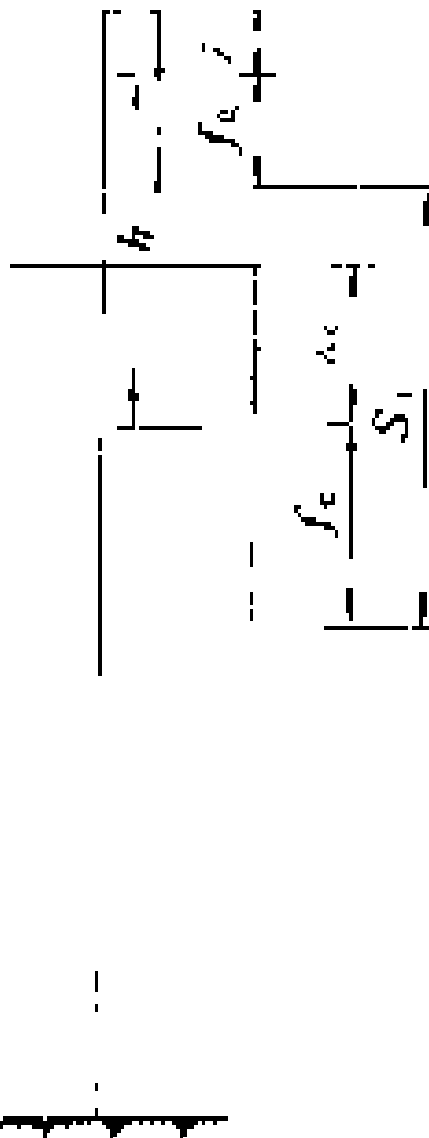
$$S_3 \geq 0.1U_0 \tag{3}$$

式中l为档距长度，m；I为耐雷水平，kA；U<sub>0</sub>为输电线路额定电压，kV。式(1)是从运行经验总结出来的，

表1 档距中央架空地线和导线的要求距离

额定电压U <sub>0</sub> (kV)	35	110	220	330	500
耐雷水平I (kA)	30	75	120	140	160
S <sub>1</sub> (m)	3	1.5	12	14	18
S <sub>2</sub> (m)	3.5	11	22	33	50
S <sub>3</sub> =S <sub>2</sub> 时 I (m)	167	542	917	1083	1250

对于一般档距，雷击档距中央架空地线时不会引起对导线的反击。式(2)用于大档距在对应的耐雷水平时，



可防止反击。式(3)是当雷击档距中央架空地线引起对导线反击时，不能建立稳定的工频电弧条件建立的。三者的关系见表1。

图1表示导、地线在杆塔上的尺寸配合情况。当已知导线弧垂f<sub>c</sub>、导线绝缘子串长度λ<sub>c</sub>、地线串长度λ<sub>g</sub>、导线与地线悬挂点高差h时，地线弧垂f<sub>g</sub>须满足

$$f_g \leq f_c + h - S_i$$

式中i为1或2，S<sub>i</sub>值与档距有关，见表1。

图1 导、地线在杆塔上的尺寸配合情况

先根据经验初选架空地线截面A<sub>g</sub>，并确定其在温度15℃、无风时的水平应力σ<sub>g</sub>，然后计算：

(1) 地线的最大使用应力σ<sub>m</sub>，N/mm<sup>2</sup>，即设计控制条件（低温、覆冰或大风）下的水平应力，计算公式为

$$\sigma_m - \frac{l_{ab}^2 g_m^2 E}{24 \sigma_m^2} = \sigma_g - \frac{l_{ab}^2 g_1^2 E}{24 \sigma_g^2} - \alpha E (t_m - 15)$$

(2) 年平均温度下受防振条件限制的水平应力σ，N/mm<sup>2</sup>，计算公式为

$$\sigma - \frac{l_{ab}^2 g_1^2 E}{24 \sigma^2} = \sigma_g - \frac{l_{ab}^2 g_1^2 E}{24 \sigma_g^2} - \alpha E (t - 15)$$

上列式中g<sub>1</sub>为架空地线的自重比载，N/(mm<sup>2</sup>·m)；g<sub>m</sub>为应力控制条件下架空地线的综合比载，N/(mm<sup>2</sup>·m)；l<sub>ab</sub>为代表档距，m；E为架空地线的弹性系数，N/mm<sup>2</sup>；α为架空地线的温度线胀系数，1/℃；t<sub>m</sub>为应力控制条件下架空地线的温度，℃；t为年平均温度，℃。(1)、(2)项计算结果须同时满足

$$\sigma_m < \frac{\sigma_p}{2.5} \text{ 和 } \sigma < \frac{\sigma_p}{4} \tag{4}$$

式中σ<sub>p</sub>为地线的瞬时破断强度，N/mm<sup>2</sup>。如不能满足，则增大架空地线截面。重复上述过程，直至满足为止。按

中国的设计和运行经验,对于应用最广泛的钢绞线和钢芯铝绞线,按机械强度配合的架空地线截面如表 2。

表 2 架空地线和导线截面配合表

地线型号	GJ-25	GJ-35	GJ-50	GJ-70
导线型号	LGJ-35	LGJ-95	LGJ-240	LGJ-400
	LGJ-50	LGJ-120	LGJ-300	LGJQ-500 及以上
	LGJ-70	LGJ-150	LGJQ-240	
		LGJ-185	LGJQ-300	
		LGJQ-150	LGJQ-400	
		LGJQ-185		

按热稳定条件校验 按机械强度初选架空地线截面后,还须针对雷击时通过架空地线上的雷电流、正常运行时架空地线上的感应电流以及单相接地短路时架空地线的返回电流三种情况进行热稳定校验。雷击时通过架空地线上的雷电流虽高达 100 kA 以上,但作用时间仅数十微秒;正常运行时虽作用时间很长,但架空地线上的感应电流不过数十安培,两者均不起控制作用。唯有单相接地短路时,大容量电力系统的架空地线返回电流可高达数千安培,且与短路点位置、架空地线的材料、截面以及是否绝缘、杆塔接地电阻、档距长度等因素均有关。各档的架空地线电流实际分布,可用架空地线返回电流的计算机程序准确计算,但下述概略估算架空地线最大返回电流的近似法亦得到应用。如图 2 所示,在靠近大电源的输电线路终端塔上发生单相接地短路时,近端变电所供短路电流  $I_{k1}$ ,远端变电所供  $I_{k2}$ ;  $R_0$  为近端变电所接地电阻,  $R$  为故障塔接地电阻,  $R'$  为全线塔接地电阻平均值;  $Z_0$  为进线档大地-回路自阻抗,  $Z_m$  为互阻抗;  $Z'_i$  为全线各档自阻抗的平均值,  $Z'_m$  为互阻抗的平均值。

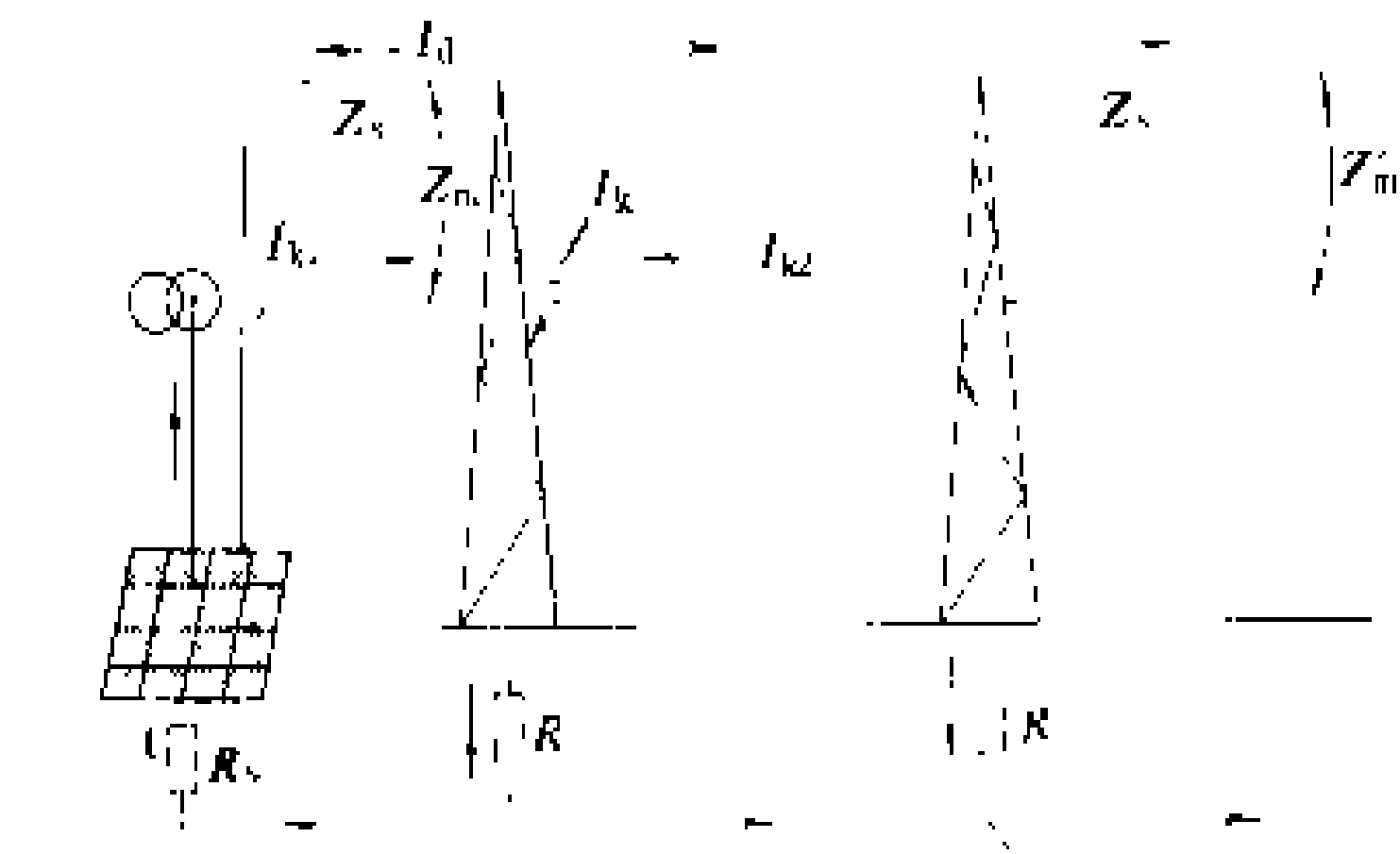


图 2 进线档单相接地短路时的电流分布

进线档架空地线返回电流  $I_d = I_{d1} + I_{d2}$ , 其强制分量  $I_{d1} = I_{k1} Z_m / Z_0$ , 自由分量  $I_{d2} = [I_{k1} (1 - Z_m / Z_0) + I_{k2} (1 - Z'_m / Z'_i)] Z_0 / (Z_0 + R_0)$ , 其中  $Z_0 = 1 / [1 / R_0 + 1 / (R_0 + Z_0) + 1 / Z_\infty]$ ,  $Z_\infty \approx 0.5 Z'_i + \sqrt{R' Z'_i}$ 。已知进线档架空地线返回电流  $I_d$  后,按 SDJ8《电力设备

接地设计技术规程》进行热稳定校验,并要求

$$A_d \geq \frac{I_d \sqrt{t_d}}{C} \tag{5}$$

式中  $A_d$  为按热稳定要求的最小截面,  $\text{mm}^2$ ;  $t_d$  为短路的等效持续时间,按主保护动作时间并考虑自动重合闸不成功或断路器拒动等因素,一般取 0.5~1.0 s;  $C$  为架空地线材料的热稳定系数,对于钢绞线  $C = 70$ ,对于铝绞线  $C = 120$ 。根据式 (5),常用的钢绞线单根允许最大通过的电流值如表 3。

按电信线电磁危险影响允许条件校验 电信线路和输电线路平行接近很长一段距离或输电线路的架空地线绝缘时,架空地线返回电流中的强制分量对电信线路起主要屏蔽作用。准确计算架空地线返回电流的分布须利用计算机程序,但亦可用下述近似法概略估算。

表 3 按热稳定校验的最大允许电流值 (A)

架空地线型号	$t_d=1.0s$	$t_d=0.5s$
GJ-25	1760	2500
GJ-35	2600	3680
GJ-50	3400	4900
GJ-70	4710	6660

注:同样截面铝绞线的最大允许电流是表中数值的 1.7 倍。

如图 3 所示,当输电线路单相接地短路时,在平行接近的电信线上的感应纵电动势为

$$E = 2\pi f M L I_B r \tag{6}$$

式中  $f$  为输电线路的交流电频率, Hz;  $L$  为电信线与输电线路平行段长度, km;  $M$  为输电线与电信线间的互感, H/km;  $r$  为架空地线的屏蔽系数。

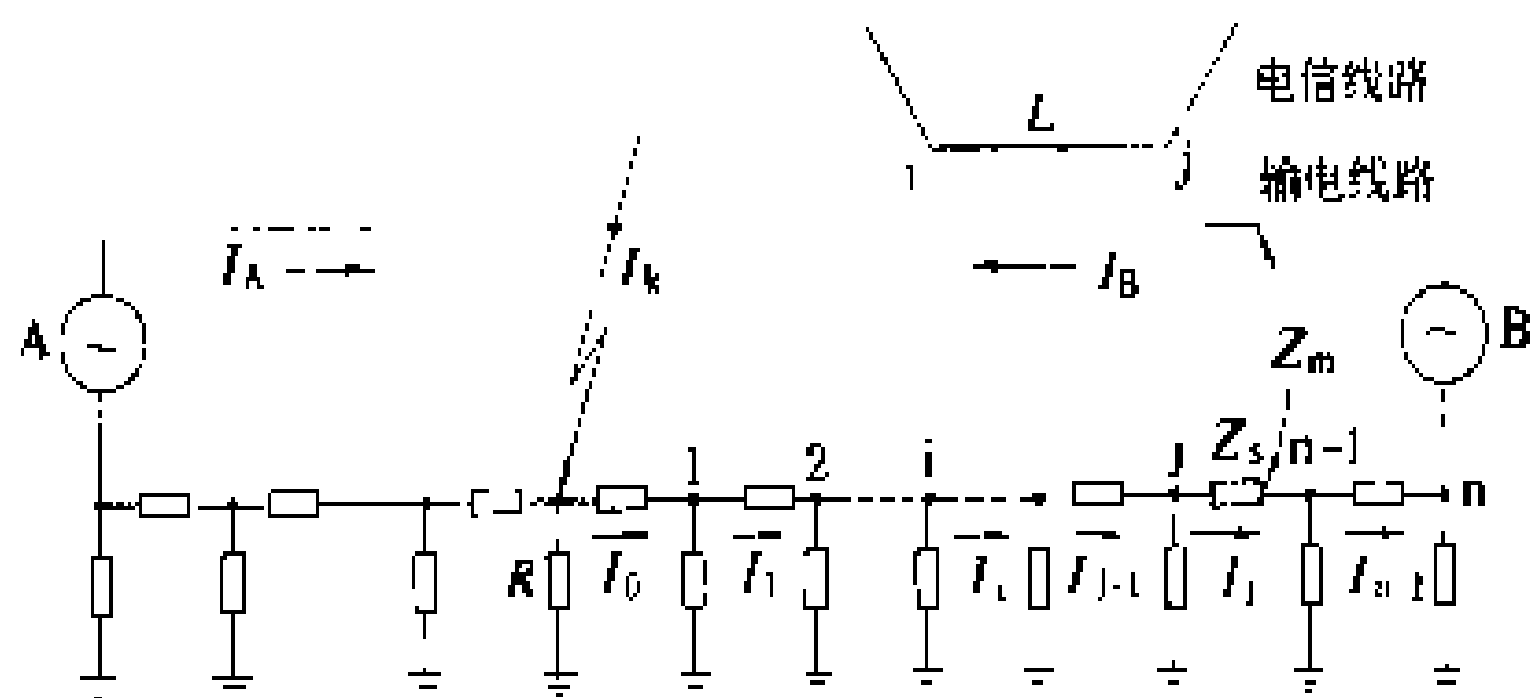


图 3 架空地线返回电流分布

短路电流  $I_k$  及其分量  $I_A$  和  $I_B$  可按对称分量法计算。朝 B 变电所方向的架空地线返回电流强制分量为  $I_{d1} = I_B Z_m / Z_0$ 。架空地线返回电流自由分量,可取输电线路的平均接地电阻  $R$  和平均档距自阻抗  $Z_0$ ,按下述方法进行估算。

令  $K = \frac{I_i}{I_{i-1}} = \frac{R}{R + 0.5Z_s + \sqrt{RZ_s}}$ ，则从 i 塔到 j 塔

段间的自由分量平均值

$$\frac{\sum_{i=1}^{j-1} I_k}{j-i} = \frac{K^i(1-K)^{j-i}}{(j-i)(1-K)} I_0$$

式中  $I_0 = I_k \left(1 - \frac{Z_m}{Z_s}\right) \frac{Z_1}{0.5Z_s + \sqrt{RZ_s}}$ ,

$$Z_1 = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{2}{0.5Z_s + \sqrt{RZ_s}}}$$

按自由分量的平均值计，则从 i 塔到 j 塔段间的架空地线返回电流  $I_d = \frac{Z_m}{Z_s} I_B + \frac{K^i(1-K)^{j-i}}{(j-i)(1-K)} I_0$ 。

从 i 塔到 j 塔段间架空地线的屏蔽系数为

$$r = 1 - \frac{I_d}{I_B} \tag{7}$$

根据初选的架空地线截面，按式 (7) 和式 (6) 计算电信线上的感应纵电动势  $E$ 。如  $E$  超过允许值，则加大该段架空地线截面。但在阻抗  $Z_s$  中，电阻分量不起主导作用，故加大架空地线截面对改善屏蔽效果并不显著。

按潜供电流条件校验 电力系统稳定需要的单相自动重合闸无电流间隙时间，对潜供电流自灭时间有一定的要求。当系统稳定要求的潜供电流自灭时间小于潜供电流可能的自灭时间时，则需采取措施限制潜供电流。潜供电流的大小与输电线路长度、潮流大小、故障点位置以及架空地线截面等因素有关。为判别是否需要限制潜供电流，必须对潜供电流的大小与其可能的自灭时间的定量关系进行研究。

如果采用高压并联电抗器限制工频过电压和补偿充电功率，则在电抗器中性点加小电抗是限制潜供电流的最经济合理的措施。当不用并联电抗器时，采用良导体架空地线也是降低潜供电流的可行措施。潜供电流的大小需按系统运行方式采用计算机程序计算。简化计算时可不考虑动态过程，按开始两相运行(即零秒方式)计算任意架空地线截面的潜供电流值，以提供技术经济比较。

按高频信号通道条件校验 中国曾在 110~220 kV 输电线路采用过架空地线载波通信，运行情况不十分满意。钢绞线的架空地线传输高频信号的衰减很大，几乎是同等截面有色金属线的 10 倍，故一般要求采用良导体架空地线。根据通信系统分配的载波频率、地线载波机的输出功率、绝缘地线的干扰电平、接收端允许信噪比和其他衰减等因素，规划出架空地线单位长度的允许衰减值，就可从有关手册中查得所需

的架空地线截面。

目前，中国电力系统已很少采用架空地线载波通信，而光纤复合地线通信已进入应用阶段。光纤芯的外层股线一般为铝包钢线，其机械性能接近钢绞线，电气性能则优于钢绞线，故可仿效钢绞线方式选择截面。光纤复合地线价格昂贵，广泛应用将使输电线路造价普遍提高，须经综合分析研究决定。

参考书目

[苏] 米里尼科夫等著，330~500 千伏架空输电线路电气部分的设计，湖北省高电压协作组等译，北京：水利电力出版社，1977

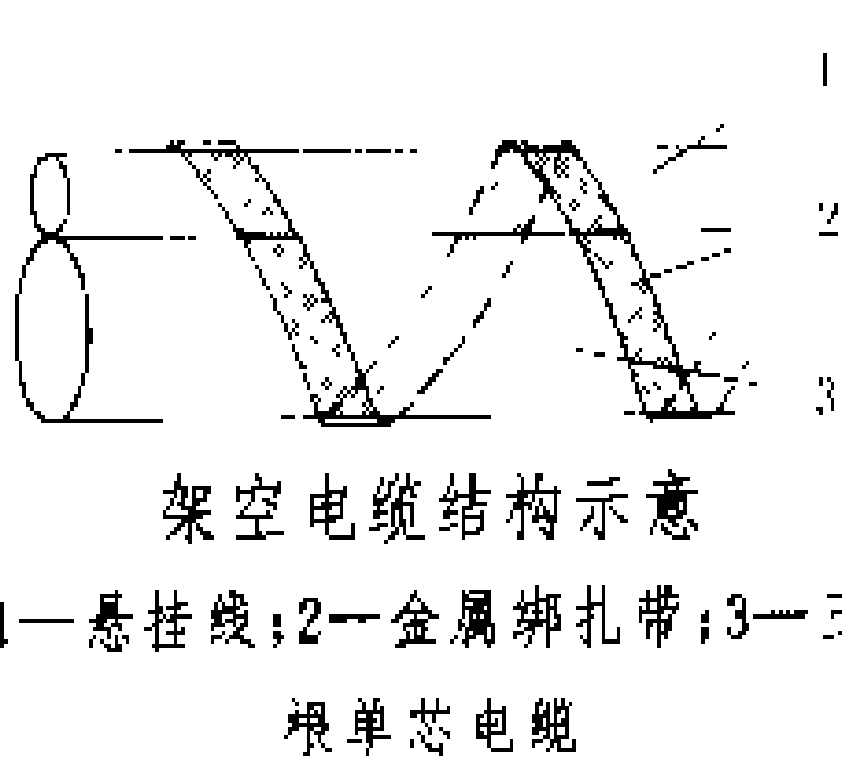
(聂国一)

jiakong dianlan

**架空电缆** (aerial cable) 本身带有悬挂线的用于悬挂在户外地面之上的电力电缆。

架空电缆通常悬挂在电杆或建筑物墙上，一般为 10 kV 及以下电压等级，特别适用于下列情况：①希望线路与环境尽可能不要相互影响的场所，如线路穿越人行道、树木、狭窄的街道或里弄时；②需要利用已有电杆与低压架空绝缘电线、架空线或通信线同杆架设时；③扩建配电网时；④为建筑工地作临时施工用电线路或修复线路期间作临时供电线时；⑤作变电站或开关站的进线或出线，此时可不需穿墙套管。

架空电缆由三根单芯电缆绞合并与一根悬挂线绑扎在一起。每根单芯电缆由导体、半导体层导体屏蔽、绝缘层、半导体层和金属带构成的绝缘屏蔽以及耐气候和光老化的外护层组成。由于三根单芯电缆用金属绑扎带和悬挂线紧扎在一起，因此悬挂线能承受架空电缆的全部重量而不需要其它附加构件，故也称自承式架空电缆。图示为架空电缆结构示意图。



在安装架空电缆时，先在电杆或建筑物墙上装好挂钩和悬挂线夹，再将架空电缆的悬挂线装在悬挂线夹中，不需要瓷横担和针式绝缘子，降

低了敷设投资。架空电缆的悬挂线的两端必须接地。在长线路上，架空电缆的金属带也须每隔一定距离加以接地，使不接地部分的长度小于 1 km。架空电缆线路比传统的架空线安全可靠，线路阻抗小，比地下电缆线路经济。架空电缆的电气性能要求与地下电缆完全相同。

早在 20 世纪 40 年代，架空电缆在美国农村得到应用，由于当时的成本较高未得到推广，只是在价格比



较便宜的轻型绝缘材料交联聚乙烯的出现和在城市中开始应用后，架空电缆才得到迅速发展。

(许精潜)

架空配电线路设计施工 (overhead distribution line design and construction)

对架空配电线路的导线、杆塔、基础和绝缘子的合理选型进行研究，作出设计，然后按照设计图纸进行施工。配电线路的设计施工，要求达到技术上先进可靠，投资省，质量好，满足运行要求。高压架空配电线路的设计施工与架空输电线路的基本相同，其主要不同点是：高压架空配电线路的电气要求与力学负载均较低；导线对地距离按照交叉跨越物或通行车辆的高度选定，不考虑电场效应的影响；导线最小截面在 110 kV 及以下时不受电晕损耗限制；对导线表面光洁度的要求没有输电线路那样严格，架线施工时导线可以在农田中着地牵引放线；线路档距较小，杆塔相对较轻，施工较方便。中、低压架空配电线路的电气要求与力学负载随着电压等级的降低亦相应下降，不采用避雷线，档距小，电杆低，导线安全系数大，不需要防震措施，而且线间距离小，负载轻，电杆采用轻型钢筋混凝土杆、木杆或管状塑料杆，采用直埋式基础，施工比较简便。(见杆塔基础、架线施工、输电线路导线截面选择、架空地线截面选择、架空线力学计算、输电线路电气设计、输电线路绝缘设计)

**架空配电线路设计** 包括设计标准，气象条件，路径选择，导线选择，避雷线选择，杆塔选择，档距、弧垂和杆高的确定，导线弧垂曲线，线间距离，杆塔基础，绝缘子选择等内容。

**设计标准** 各国电力部门均制订有各自的设计标准。在中国，现行的设计标准分为两个规程：35 kV 及以上使用《架空送电线路设计技术规程》；10 kV 及以下使用《架空配电线路设计技术规程》。城市配电线路设计更需符合《城市电力网规划设计导则》的规定。

**气象条件** 根据线路所在地区大风、覆冰、低温等气象资料决定。具体数值按照电压越高取值越大的原则以及各国对线路适应气象条件的要求不同，采用 5 年一遇直至 50 年一遇的数值不等。中国曾规定采用 5 年发生一次的平均值。1974 年以后，根据数理统计方法，对 35 kV 及以上架空电力线路，按照《架空送电线路设计技术规程》的要求，一般采用 15 年一遇的数值；对 10 kV 及以下的架空配电线路，按照《架空配电线路设计技术规程》的要求，一般采用 10 年一遇的数值。(见输电线路设计用气象条件)

**路径选择** 其原则与要求是：①与城镇规划相协调，与配电网改造发展相结合；②综合考虑运行、施工、交通条件和路径长度等因素；③尽量少占农田；④采取有效措施防止对邻近设施如电台、弱电线路等的影响；⑤避开有爆炸物、易燃物和可燃液(气)体的生产厂房、仓库、贮藏罐等；⑥尽量避开洼地、冲刷地带以及易被车辆碰撞等处；⑦不应引起交通和机耕困难。

**导线选择** 高压架空配电线路各国通常采用钢芯铝绞线、铝合金线；中、低压架空配电线路通常采用铝绞线、铝合金线、钢芯铝绞线，负荷密度较大的地区亦有采用铜绞线的。城市及乡镇的配电线路常采用带绝缘护层的导线。选择导线截面时，通常考虑 5~10 年的用电负荷发展规划，并符合以下要求：①导线发热条件限制。中国规定导线温升一般不超过 70℃，许多国家对钢芯铝绞线的温升值规定为 70~80℃；对交联聚乙烯绝缘导线温升允许值为 90℃。②高压架空配电线路按经济电流密度选择导线截面；中、低压架空配电线路按电压损失要求选择导线截面。③导线的机械强度安全系数，对一般地区不小于 2.5，对城镇主要街道、厂区及人口稠密的地区不小于 3.0。对城市配电网各级电压架空线路导线截面的选择，尚需按照各国(地区)有关部门颁发的安全准则中对供电可靠性的要求，考虑在配电网异常运行情况下导线的负荷电流。

**避雷线选择** 见架空地线截面选择。

**杆塔选择** 配电线路的杆塔，分为直线型和耐张型两类。直线型包括直线杆塔和直线转角杆塔；耐张型包括耐张、支接、转角和终端杆塔。直线型的杆塔主要采用钢筋混凝土杆，强度安全系数不小于 1.7，预应力钢筋混凝土杆不小于 1.8。当杆高和强度难以满足要求时，可以采用钢管杆、拉线杆塔或自立式铁塔。

**档距、弧垂和杆高的确定** 两相邻杆塔之间的水

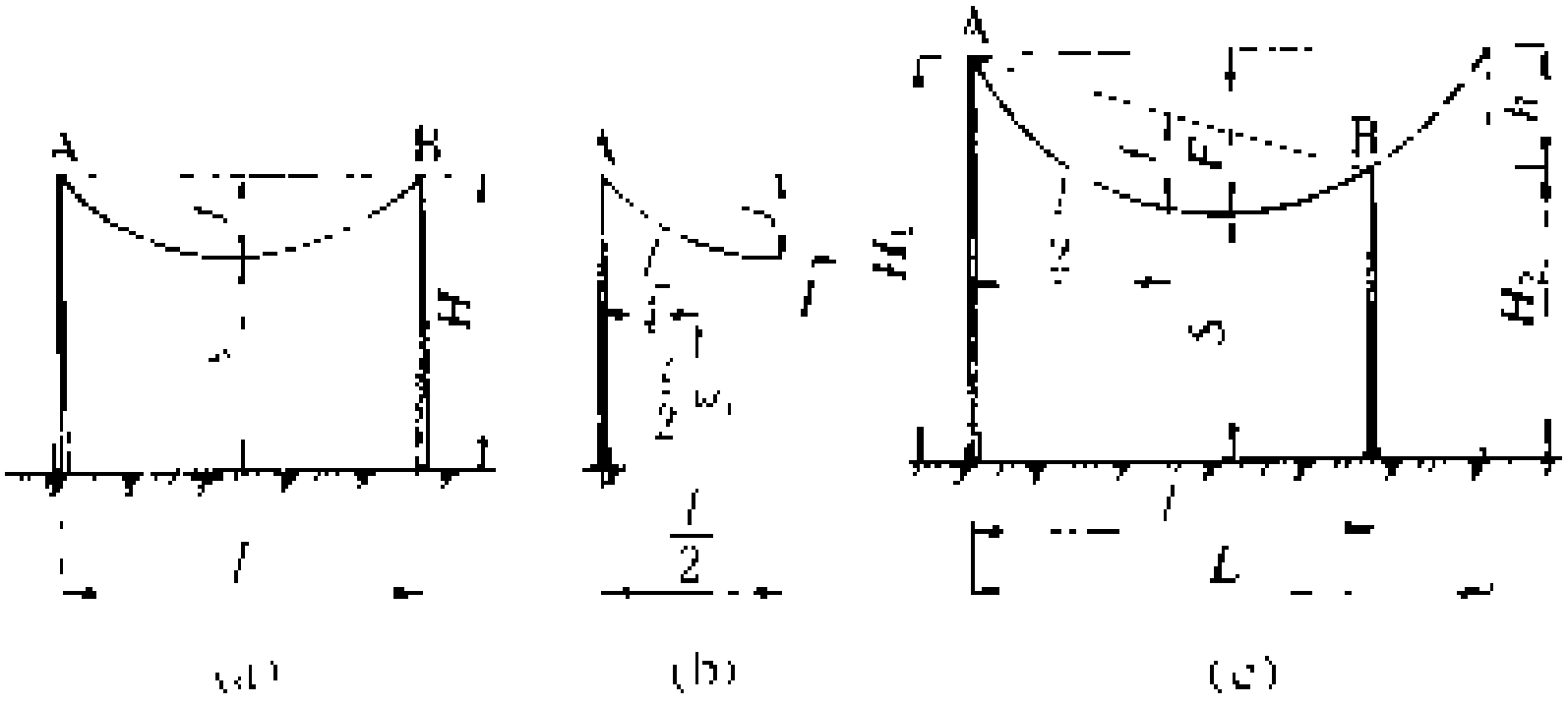


图 1 档距、弧垂、杆高示意图  
(a) 悬挂点等高；(b) 弧垂公式图解；  
(c) 悬挂点不等高

平距离，称为档距。档距中央导线至两杆塔上导线悬挂点连线之间的垂直距离( $f$ )，称为弧垂(见图 1)。一般中、低压架空配电线路的档距如表 1。高压架空配电

线路的档距除同杆线路外，一般都在 100 m 以上。

表 1 中、低压架空配电线路的档距 (m)

地区	中压配电线路	低压配电线路
城区	40~50	40~50
郊区	60~100	40~60

导线弧垂可按抛物线公式计算，即

$$f = \frac{l^2 w_0}{8T}$$

式中  $f$  为弧垂，m； $l$  为档距，m； $w_0$  为单位长度导线重力，N/m； $T$  为导线最低点拉力，N。当两悬挂点高度不等时(高差  $h$  不超过档距的 10%)，导线弧垂最低点不在档距中央，如图 1(c) 所示，此时可根据下列关系式求出导线对地的最小距离  $S$ ，即

$$H_1 = F + S$$

$$H_2 = H_1 - h$$

$$F = \frac{L^2 w_0}{8T}$$

$$L = l + \frac{2Th}{w_0 l}$$

式中  $H_1$ 、 $H_2$  为杆塔悬挂点高度，m； $F$  为档距为  $L$  悬挂点等高时的导线弧垂，m； $L$  为导线弧垂曲线延长到两悬挂点等高时的档距，m； $S$  为导线与地面的最小距离，m。 $S$  值的取值标准如表 2 所列。

表 2 导线与地面的最小距离  $S$  取值标准 (m)

线路经过地区	线路电压		
	高压	中压	低压
居民区(工业企业地区、港口、码头、车站、城镇等人口密集地区)	7	6.5	6
非居民区(上述居民区以外的地区)	6	5.5	5
交通困难地区(车辆、农业机械不能到达的地区)	5	4.5	4

表 2 适用于裸导线。当采用绝缘导线后，高、中、低压导线对地面的最小距离可以按表 2 中低压导线的数值减去 0.5 m (电气安全间距)。

配电线路的杆塔高度，可以通过档距的改变，在理论上求出每千米造价最低的杆塔高度，称为经济塔高(经济杆高)，工程中通常取为标准塔高，与此相对应的档距，称为标准档距。配电线路实际使用的档距，尚需根据环境条件、导线排列型式、运行、施工、制造、运输等各种技术条件来选定。

导线的弧垂随气象条件变化而变化，气温高，导线膨胀伸长，拉力减小，弧垂变大；导线上覆冰后，单位重量增加，弧垂亦增大，但覆冰时气温降至零度以下，导线收缩，拉力增大，弧垂减小。因此，导线的最大弧垂可能发生在最高气温时，也可能发生在最大覆冰时，需根据具体气象条件计算后确定。

导线弧垂曲线 以档距为横坐标，导线弧垂为纵坐标，根据各种施工气温下的弧垂数据绘制的安装曲线。一般每隔 10℃ 绘一根曲线。各种气温下的弧垂是按抛物线公式计算的，公式中的导线拉力(无风、无冰)是根据架空线最大使用拉力和控制气象条件下导线的综合负重(导线自重或加冰重后与风负载的几何和)代入架空线状态方程式求得的。因此，按曲线上的弧垂施工，可以在运行中保证各种计算气象条件下的导线拉力都不超过设计最大使用拉力，且能使导线对地面和被跨越物之间的安全距离符合设计要求。

线间距离 各相导线间的线间距离，根据运行经验确定。按中国运行情况，中、低压架空配电线路最小的线间距离如表 3 所列。表 3 中的最小线间距离，适用于各种裸导线的排列方式。绝缘导线的线间距离较小，甚至可以三相低压架空配电线路的三相四线或另加路灯线绞在一起挂在电杆上。高压架空配电线路的线间距离，按电压高低一般以经验公式计算，即

$$D = 0.4\lambda + \frac{U}{110} + 0.65 \sqrt{f}$$

式中  $D$  为水平线间距离，m； $\lambda$  为悬式绝缘子串长度，m； $U$  为线间电压，kV； $f$  为最大弧垂，m。垂直线间距离一般取为水平线间距离的 75%，但 35kV 线路应不小于 2 m，60 kV 线路应不小于 2.25 m，110 kV 线路应不小于 3.5 m。

表 3 中、低压架空配电线路最小线间距离 (m)

线路电压	线路档距								
	40 及以下	50	60	70	80	90	100	110	120
中压	0.6	0.65	0.7	0.75	0.85	0.9	1.0	1.05	1.15
低压	0.3	0.4	0.45	0.5					

杆塔基础 中、低压架空配电线路的电杆基础，以直埋为主，埋设深度一般采用表 4 中所列的数值。中国流行一种习惯的估计方法，即电杆埋深为其全长的 1/6，其数值与表 4 中的相近。但均需进行倾覆稳定

表 4 电杆埋设深度 (m)

杆高	8	9	10	11	12	13	15
埋深	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.3

验算。直线杆的倾覆稳定安全系数应不小于 1.5。高压配电线路的电杆基础，必须进行计算。基础型式根据受力大小及土质情况，有混凝土浇制的棱形基础、阶梯形基础、预制的卡盘基础、桩式基础及用拉线稳定的直埋式基础，如图 2 所示。铁塔的基础见杆塔基础。

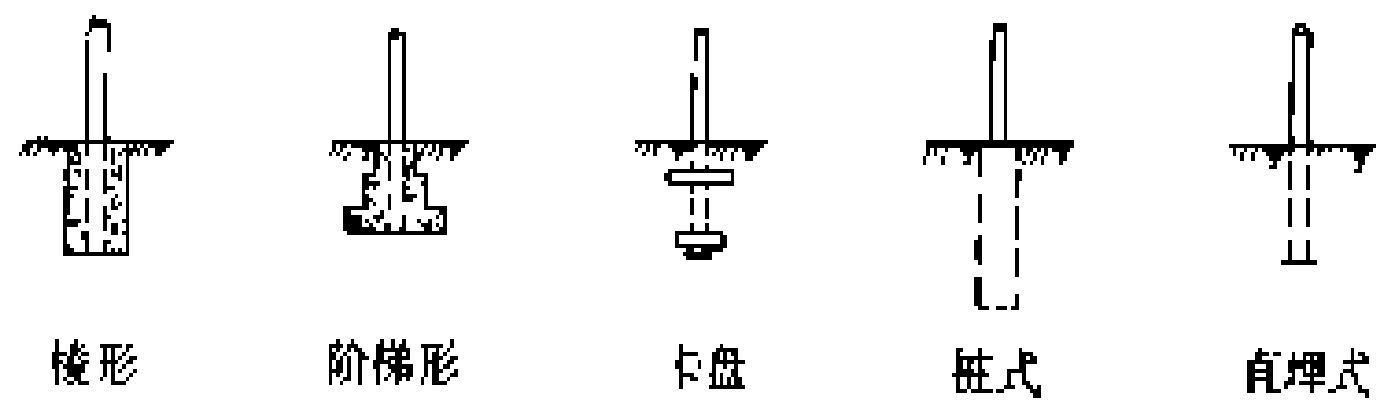


图 2 电杆基础一览图

**绝缘子选择** 见高压架空配电线路、中压架空配电线路、低压架空配电线路。

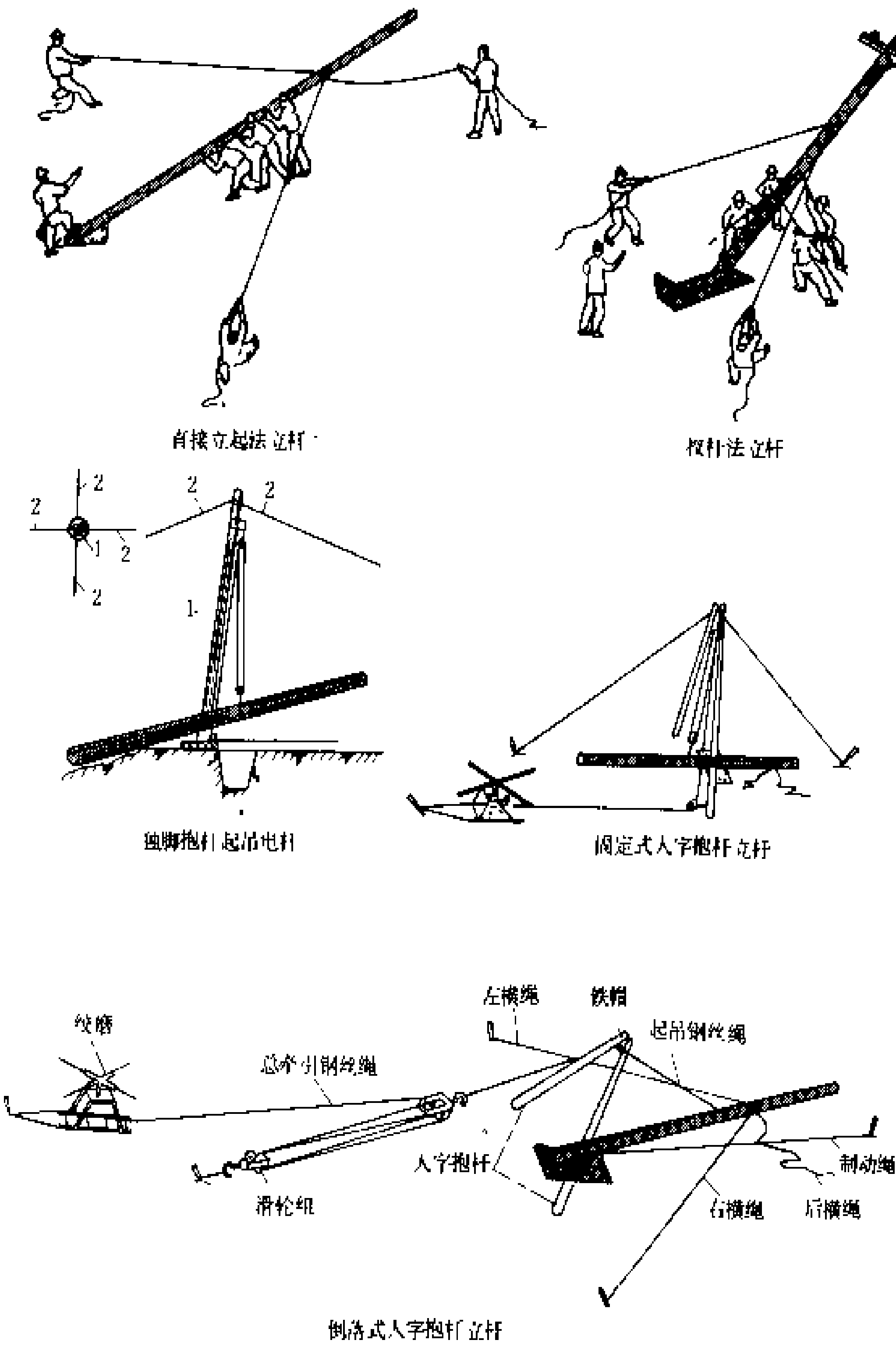


图 3 各种立杆方法

**架空配电线路施工** 主要包括挖坑、立杆、放线、紧线等施工步骤。

**施工标准** 主要从八个方面检验：①施工器材检验；②施工测量；③杆塔基础；④杆塔组立；⑤拉线安装；⑥导线架设；⑦接地；⑧导线对地距离及交叉

跨越。在中国，现行的施工标准分为两个规范：35 kV 及以上使用《架空送电线路施工及验收规范》；10 kV 及以下使用《电气装置安装工程施工验收规范》。

**挖坑** 有人力开挖、机械开挖和爆破等方法。除坚硬岩石采用爆破方法以外，大部分基坑采用人力开挖，在城区地下管线无妨碍的坑位或农村施工机具容易到达的坑位，可采用机械驱动的螺旋钻挖坑。

**立杆** 有直接起立法、杈杆法、独脚抱杆起吊法、固定人字抱杆起吊法、倒落式人字抱杆起立法及机械起吊法等（见图 3）。①直接起立法：不用工具，有 4~5 人用肩和手扛起电杆，适用于长度为 7~9 m 的木杆和轻型水泥杆。②杈杆法：用杈杆立杆，施工简单，适用长度为 10 m 以下的木杆及轻型水泥杆。③独脚抱杆法：适用于起吊荷重在 30 kN 以下，场地受到限制不能设置人字抱杆及牵引制动装置的场合。④固定人字抱杆法：起吊荷重比独脚抱杆大，抱杆稳定，容易操作。⑤倒落式人字抱杆法：起吊时抱杆不是立起固定的，而是随着总牵引钢丝绳的收紧而使抱杆徐徐起立，同时使电杆竖起。倒落式人字抱杆法可以起吊单杆、双杆及铁塔，抱杆的高度为杆塔重心高度的 0.8~1 倍，但施工场地较大，所以主要在开阔地区高压配电线路及输电线路整体组立双杆时应用。⑥机械起吊法：在交通条件许可的地方，可以用汽车吊或履带式专用吊车，替代上述各种施工方法。在交通困难的地区，也可使用专用直升飞机起吊杆塔。

**放线** 常用的放线方法有地面拖线法和张力放线法两种。①地面拖线法：利用人力或牲畜沿线路直接放线，当沿线地形条件许可时，可采用汽车或拖拉机牵引放线。②张力放线法：用牵引绳以一定张力牵引导线通过各基杆塔横担上安装的放线滑轮，导线可以不着地放线（见架线施工）。张力放线法比较复杂，一般应用在输电线路以及重要交叉跨越处，如跨越铁路、通航河流、主要通信线、电力线等。

**紧线** 按照设计的弧垂或相应的拉力将放好的导线收紧。紧线方法是先把导线一端固定在紧线区间（一般即为耐张段长度，是两转角耐张杆塔之间的距离）起点耐张杆塔的耐张绝缘子金具上，然后在终点紧线端用人力或机械设备牵引导线的另一端，直到观测档（紧线区间中选择档距较大、高差较小

的档距作为弧垂观测档)的弧垂达到设计值后,再把导线固定在终点耐张杆塔的耐张绝缘子金具上。

观测档的弧垂值,对孤立档(紧线区间无直线杆,仅两基耐张杆塔组成一档)可按照施工时的气温值直接从设计弧垂曲线中查得;对高压配电线路采用悬式绝缘子的连续档(紧线区间有直线杆组成各档),因地形条件限制,各档档距长度不完全相同,施工弧垂应按式计算,即

$$f = f_k \left( \frac{l}{l_k} \right)^2$$

$$l_k = \sqrt{\frac{\sum l^3}{\sum l}}$$

式中  $f$  为观测档施工弧垂, m;  $l_k$  为代表档距(为了简化计算,各连续档距用等价的孤立档距代表)的长度, m;  $\sum l$  为耐张段长度, m;  $\sum l^3$  为耐张段中各档档距立方之和,  $m^3$ ;  $l$  为观测档档距, m;  $f_k$  为代表档距的弧垂(可按代表档距的大小从弧垂曲线上查得), m。

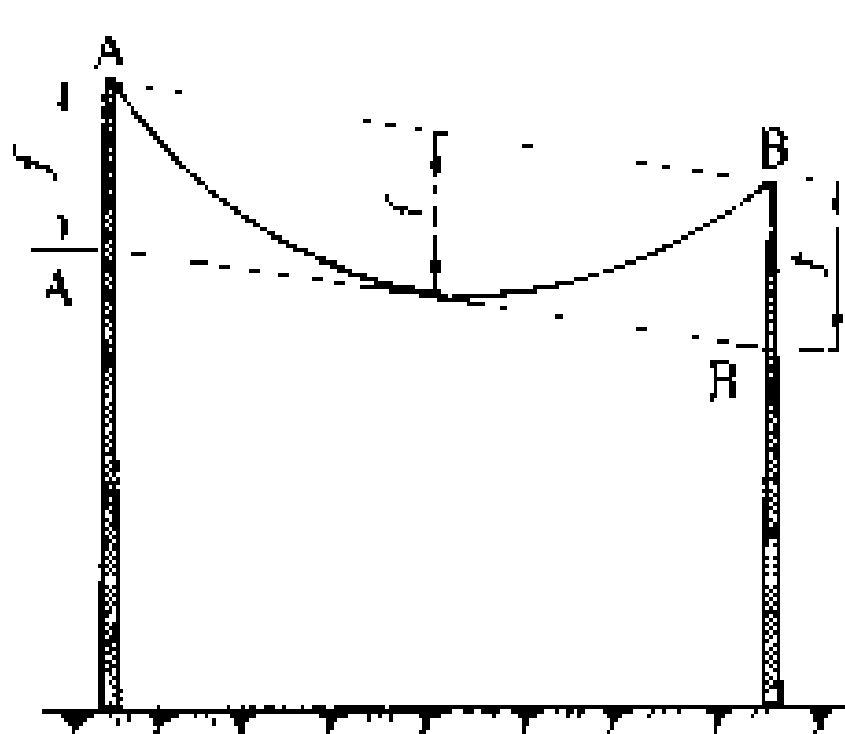


图4 平行四边形法观测弧垂

在配电线路的弧垂观测方法,普遍使用等长法,或称平行四边形法(见图4),即在观测的两杆塔上各挂一长度等于弧垂的弧垂尺,观测人员在杆塔上用眼观看弧垂尺形成 A'B' 视线,然后收紧或放松导线,使档距中央的导线与 A'B' 视线相切,则导线的弧垂值即为正确的弧垂值。

参考书目

杜玉清等, 送电工人施工手册. 北京: 水利电力出版社, 1986

周振山, 高压架空送电线路机械计算. 北京: 水利电力出版社, 1984

(周德新)

jiakong shudian xianlu

架空输电线路 (overhead transmission line)

用绝缘子将裸导线悬空架设在支持杆塔上以连接电力网、发电厂、变电所实现输送电力目的的电力设施。与电力电缆线路相比,架空输电线路造价比较低,建设速度快,运行维护方便。因此目前除特殊情况外,一般均采用架空输电线路。

架空输电线路由导线、架空地线、绝缘子、金具、杆塔、基础以及接地装置等部分组成。

导线 架空输电线路的主要组成部分,用以传输电能。一般线路每相多为单根导线。对于超高压、大容

量线路,为了减少电晕损耗、电晕干扰和增加输电能力,每相都采用两根或多根导线组成的分裂导线。导线由有色金属制成,过去曾采用铜线,现在一般多用钢芯铝绞线或钢芯铝合金绞线。(见架空线)

架空地线 架设在导线上方的杆塔顶部并在每基杆塔处接地的金属线。用以防止雷电直击导线,保证线路安全送电。根据需要,架空地线还可以用作电信线。为提高架空输电线路的耐雷水平,还可在导线下面增设耦合地线。架空地线大多采用镀锌钢绞线,有特殊要求时,也可采用钢芯铝绞线、铝合金绞线、铝包钢绞线等良导体以及通信功能优良的光缆复合架空地线 (composite fiber optic overhead ground wire, 简称 OPGW)。在雷电活动比较少的地区,有些架空输电线路可以不架设架空地线。(见避雷线)

绝缘子 用来支持或悬吊导线并在杆塔与导线之间形成电气绝缘的组件。高压输电线路一般采用盘形悬式绝缘子成串组合,也有的采用棒形绝缘子;电压较低的线路则采用针式绝缘子。绝缘子的材质有电瓷和玻璃两种。近年来欧美国家开始发展由环氧树脂、玻璃纤维和硅橡胶等人工材料制成的合成绝缘子,具有尺寸小、质地轻、耐污闪性能好等优点。中国也已研制成功 500kV 及以下各级电压的合成绝缘子,并在线路上开始应用。(见绝缘子)

金具 连接导线、架空地线及绝缘子串,并将它们固定在杆塔上的金属零件。有的金具除起到连接和固定作用外,还兼有其他附属功能。金具必须具有足够的机械强度和良好的电气性能,并满足在大气中耐腐蚀的要求。(见架空输电线路金具)

杆塔 支承导线、架空地线及其他附件的支持物。杆塔的造型和尺寸应能使导线与架空地线之间、导线与塔身之间以及导线对地和交叉跨越物之间,保持必要的电气安全距离。杆塔结构有铁塔、木杆和钢筋混凝土杆几种,高压输电线路多用铁塔。中国木材资源少,一般不用木杆,并且广泛采用钢筋混凝土杆,以减少钢材用量。(见杆塔)

基础 埋置于地下以便将杆塔固定于土壤中的装置。一般是由现场浇制或工厂预制的混凝土构成,也有的采用与铁塔连成一体型钢基础。(见杆塔基础)

接地装置 埋置于土壤中并与每基杆塔的架空地线相连接的金属装置。其作用是将直击于塔顶及架空地线的雷电流引入大地,以提高线路的耐雷水平,减少线路雷击事故。(见接地装置)

发展简史 见输配电简史。

发展趋向 架空输电线路不断朝着更高电压、更长距离和更大容量方向发展。不同的输电方案都有其局限性和适用范围,利用有限的线路走廊,同杆塔架

设多回路（甚至不同电压等级的多回路）的线路，在地少人多的发达国家和地区已普遍采用。利用现有线路进行升压增容改造，也是一项很有经济效益的措施。

近年来架空输电线路的新材料、新工艺也有很大发展。例如：铁塔采用高强度钢材和冷轧异型薄壁型钢以及高强度螺栓等材料，高标号预应力钢筋混凝土杆、钢管混凝土杆塔、悬索铁塔等结构型式也不断涌现。杆塔基础方面采用螺旋型地锚以及充分利用原状土的各种基础。导线、金具和绝缘子方面则采用铝合金线夹、合成绝缘子、耐热铝合金导线、高强度耐腐蚀导线以及自阻尼防振导线。光缆复合架空地线则是综合多方面新技术在输电线路实行综合利用。

近年来，许多国家都在研究紧凑型输电线路。一种是改变传统的导线排列方式，缩小线间距离，压缩杆塔尺寸，减小线路走廊，主要应用于高压线路深入引进城市，以简化电压层次。另一种是根据电学原理，改变分裂导线的结构，增加分裂导线的根数，优化导线排列，利用相间间隔棒等措施，以进一步改善输电线路的电气参数，减少线路波阻抗，达到增大自然功率的效果。（见紧凑型输电线路）

参考书目

[苏] 萨列斯斯基著，电力输送学，孙继祖译，北京：龙门联合书局，1954

（黄志明 宫其斌）

架空输电线路金具

**架空输电线路金具**（fittings of overhead transmission line）在架空输电线路用于悬挂、固定、保护、连接、接续架空线或绝缘子以及在拉线杆塔的拉线结构上用于连接拉线的金属器件。一般分为悬垂线夹、耐张线夹、连接金具、接续金具、保护金具和拉线金具六类。

**悬垂线夹** 在直线杆塔上悬挂架空线的金具。架空线被夹在悬垂线夹上，起到悬挂和一定的紧握作用，再经其他金具及绝缘子与杆塔的横担或地线支架相连。悬垂线夹的结构包括一个具有线槽的马鞍形船体、压紧架空线的紧固件及挂耳，如图1所示。安装时，将架空线纳入线槽，收紧紧固件使架空线不滑动。船体两端出口为弧形，适应架空线下垂趋势使之不出现硬弯。对悬垂线夹的设计要求

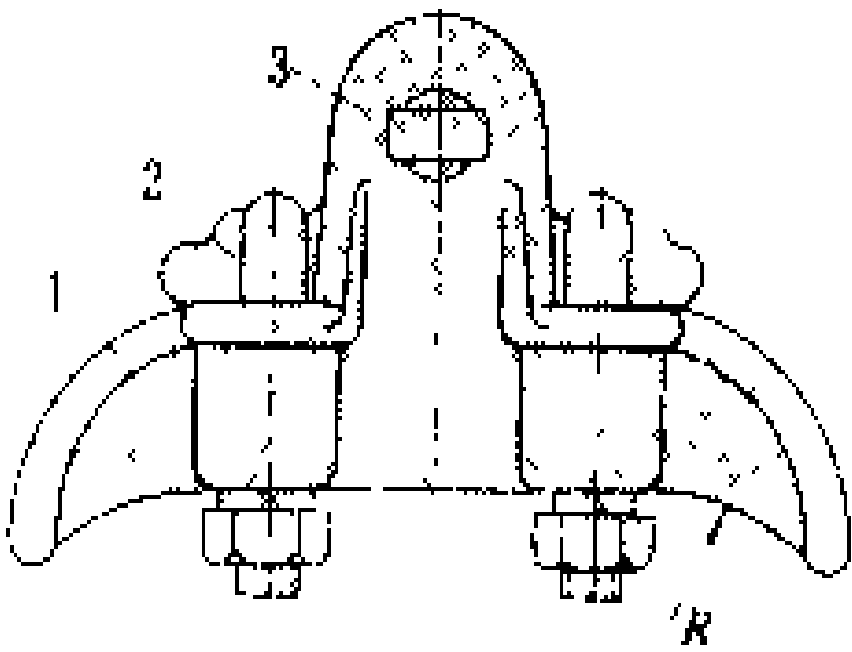


图1 悬垂线夹（提包式）  
1—船体；2—紧固件；3—挂耳

包括机械强度、对架空线的握力、适当的线槽出口曲率和较小的电磁损耗（悬挂导线时）四个方面。

悬垂线夹的机械强度，要求在正常运行情况能承受一档架空线的重力（连同其上的覆冰重力和风荷载），在断导线情况下挂耳处能承受架空线向一个方向的拉力，这个拉力相当于导线断线张力或架空地线不平衡张力。

悬垂线夹的握力应该大于在各种正常运行情况下线夹所受到的不平衡张力，在断导线情况下应大于导线的断线张力或架空地线的不平衡张力。

悬垂线夹的线槽出口曲率一般以线夹弯曲段的曲率半径来表达，见图1中的 $R$ 。 $R$ 值不能太小，避免架空线产生过大的附加弯曲应力。中国标准规定曲率半径 $R$ 应不小于架空线直径的8~10倍。

为避免用钢、铁磁性材料制造的悬垂线夹因导线流过电流面产生磁滞和涡流损耗，对大电流导线的悬垂线夹则有改用铝合金材料制造的趋势。

悬垂线夹在运行中由于两侧架空线的下垂角不同面成偏转状态。悬垂线夹依偏转轴的位置不同而分为提包式、中心回转式和上扛式三种。图1为提包式，其回转轴在架空线以上，由于其结构简单而被大多数国家采用。中心回转式的回转轴恰在架空线中心线上。上扛式的回转轴在架空线以下。

**耐张线夹** 在一个线路耐张段的两端固定架空线的金具。耐张线夹必须支持架空线的全张力，其强度和握力都要不低于架空线计算拉断强度的95%。耐张线夹包括耐张压接管、螺栓型耐张线夹和楔型耐张线夹三类。采用耐张压接管须将导线切断压接，耐张压接管既实现机械的固定又实现电气的连接。采用螺栓型耐张线夹和楔型耐张线夹不需切断导线，故只需实现机械的固定。参见彩图插页第7页23图。

**耐张压接管** 有液压型耐张压接管和爆压型耐张压接管两种。液压型耐张压接管由钢锚和铝管组成（如压接的是钢绞线则无铝管），钢锚压接钢芯铝线的钢芯，铝管压接整线和钢锚前端的环槽部分。耐张压接管的结构如图2所示。液压型耐张压接管用液压机施加

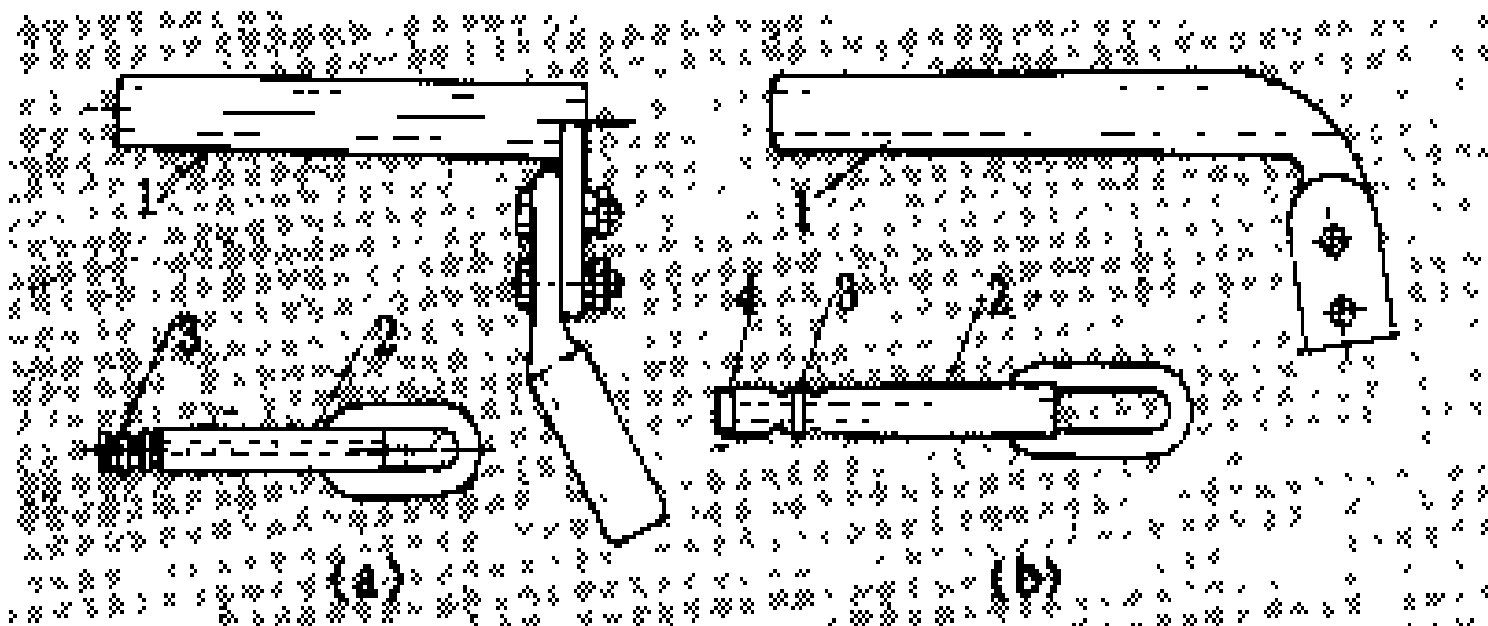


图2 耐张压接管

（a）液压型耐张压接管；（b）爆压型耐张压接管

1—铝管；2—钢锚；3—环槽；4—防烧孔

压力，爆压型耐张压接管用导爆索或太乳炸药爆炸产

生强大压力,不仅能紧紧将导线握住,同时还能得到可靠的电气连接。

**螺栓型耐张线夹** 由压块和 U 形螺栓等构成,其结构如图 3 所示。线夹握力来自两方面:①线夹后面部分由压块压力所产生的摩擦力和许多小波浪形所产生的弧面摩擦力;②线夹前部弧面所产生的摩擦力。对于一定长度的弧面,曲率半径  $R$  越小摩擦力越大,但  $R$  过小又将增大导线上的附加弯曲应力,所以选择  $R$  值要适当。螺栓型耐张线夹一般多用可锻铸铁制造,由于磁性材料的电磁损耗较大,已逐渐被铝合金代替。

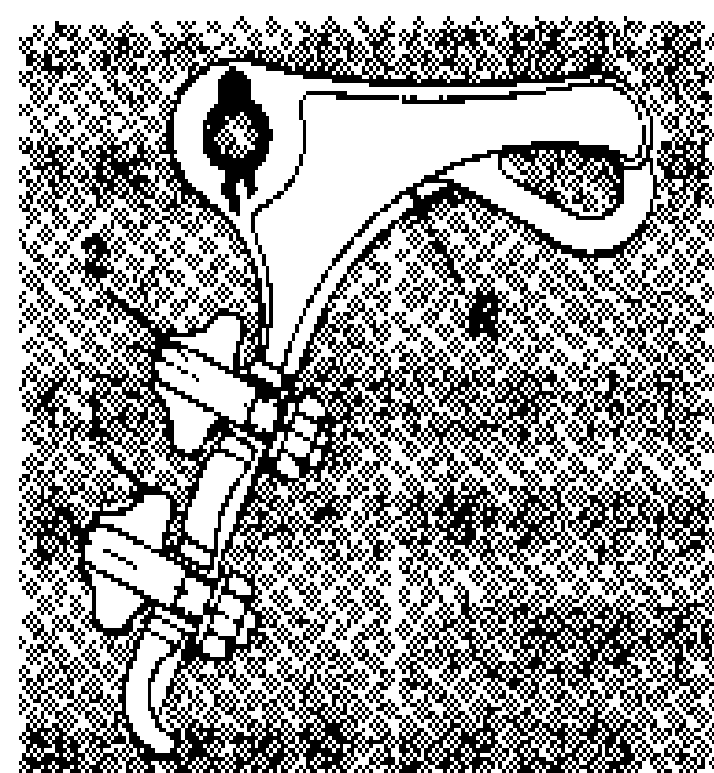


图 3 螺栓型耐张线夹  
1—压块; 2—U 形螺栓

**楔型耐张线夹** 由楔舌和楔套等部分组成,其结构如图 4 所示。当所夹的导线拉紧时,带动楔舌越挤越紧,对楔套产生正压力,从而产生摩擦力将导线固定。使用楔型耐张线夹要将导线弯转。楔型耐张线夹一般用在小截面钢绞线上。中国采用的适用于钢

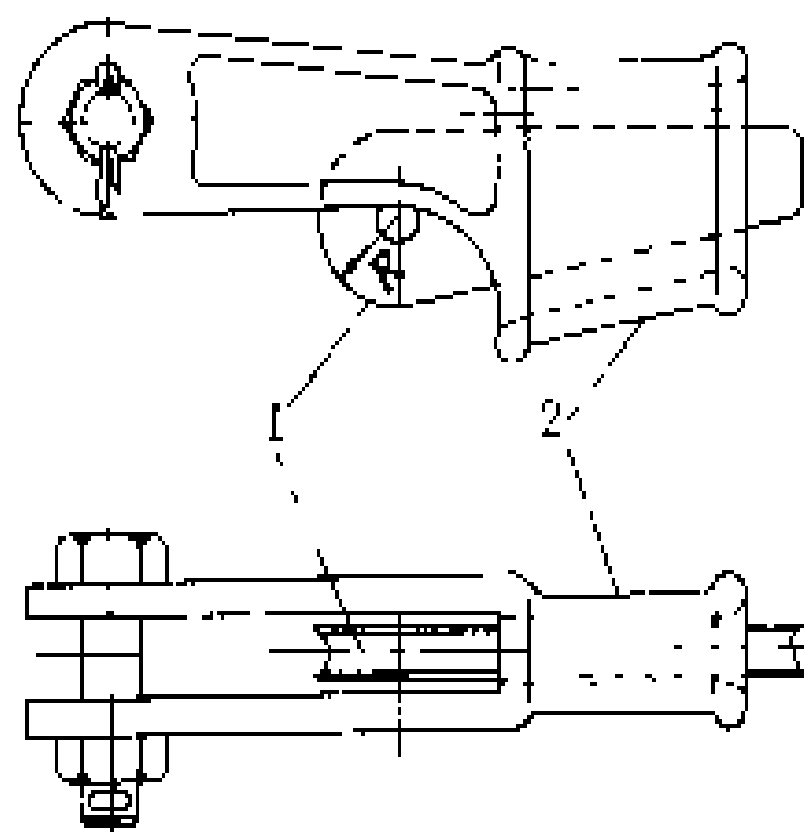


图 4 楔型耐张线夹  
1—楔舌; 2—楔套

绞线截面为  $150 \text{ mm}^2$  以下的楔型耐张线夹,用可锻铸铁或钢板制造。

**连接金具** 在悬垂绝缘子串和耐张绝缘子串中起连接作用的金具。它的种类非常多,在各种绝缘子金具组合串(或无绝缘子的金具串)中,除了线夹、保护金具和绝缘子以外,都是连接金具。如球头挂板、碗头挂板、U 形环、直角挂环、延长环、直角挂板、平行挂板、U 形挂板、联板、调整板、U 形螺丝等。其中球头挂板(或挂环)和碗头挂板是所有绝缘子金具组合串必不可少的连接金具。球头挂板是与绝缘子钢帽相连的金具,碗头挂板是与绝缘子铁脚相连的金具。除了要求它们有足够的机械强度以外,对各种尺寸的准确性要求也很高,以保证运行安全并有互换性。为便于国际通用,球头和碗头尺寸各国都采用国际电工委员会(IEC)标准,中国也是这样。图 5 和图 6 所示为悬垂绝缘子金具组合串和耐张绝缘子金具组合串。

从图 5 和图 6 可以看出,连接金具的选择原则总是令两金具之间为圆环与圆环或者圆棒与平孔之间的“面接触”,而不采取圆棒与圆棒之间的“点接触”或圆棒与圆环之间的“线接触”,以避免金具产生过大的弯

矩和过大的接触压力。

**接续金具** 用于架空线端头及跳线接续的金具,分为全张力接续金具和无张力接续金具两种。

**全张力接续金具** 输电线路的长度以百公里计,而生产厂提供的架空线每轴只有千米左右,必须依靠接续金具来连接。对于导线,接续金具不但要接续好电流通路,而且还要负担导线的全张力,其强度和握力都须不低于导线计算拉断强度的 95%。

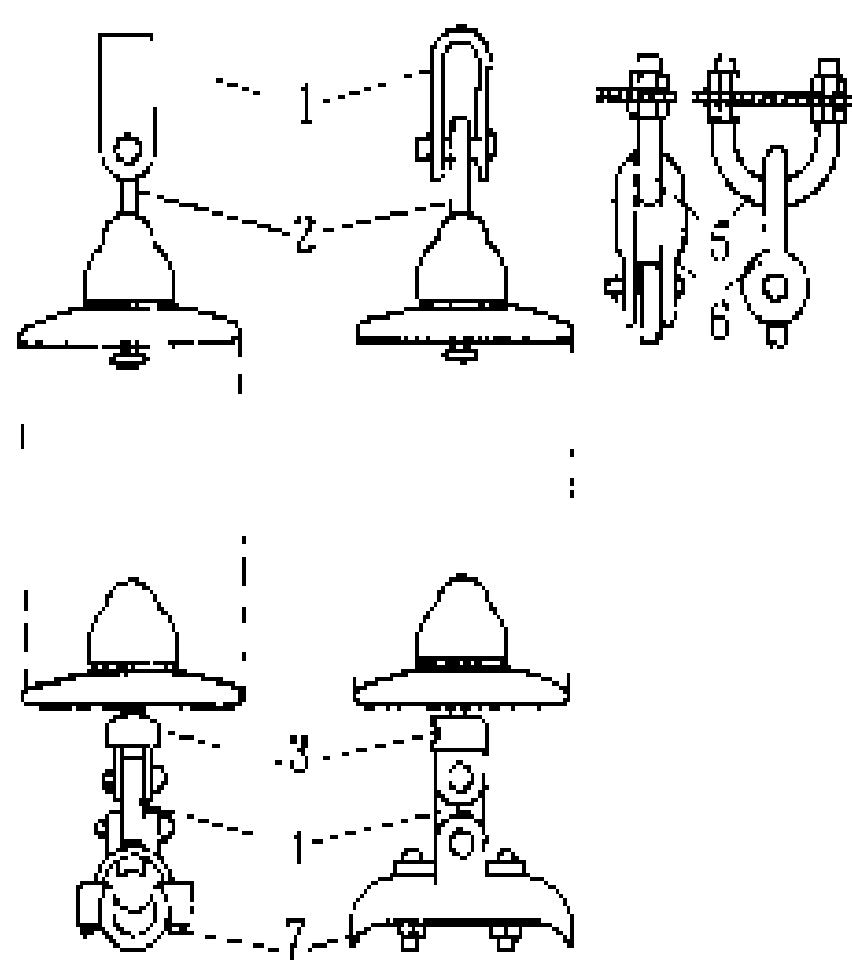


图 5 悬垂绝缘子金具组合串  
1—U 形挂板; 2—球头挂环; 3—碗头挂板; 4—单板; 5—U 形螺丝; 6—U 形环; 7—悬垂线夹

巨大的摩擦力而将导线握住。垫片的作用在于使压接时的荷载均匀分布,并降低压接处的导线应力集中程度。液压型接续管与液压型耐张压接管原理相同,钢管用以压钢芯,铝管用以压铝绞线。爆压型接续管与爆压型耐张压接管的原理相同。

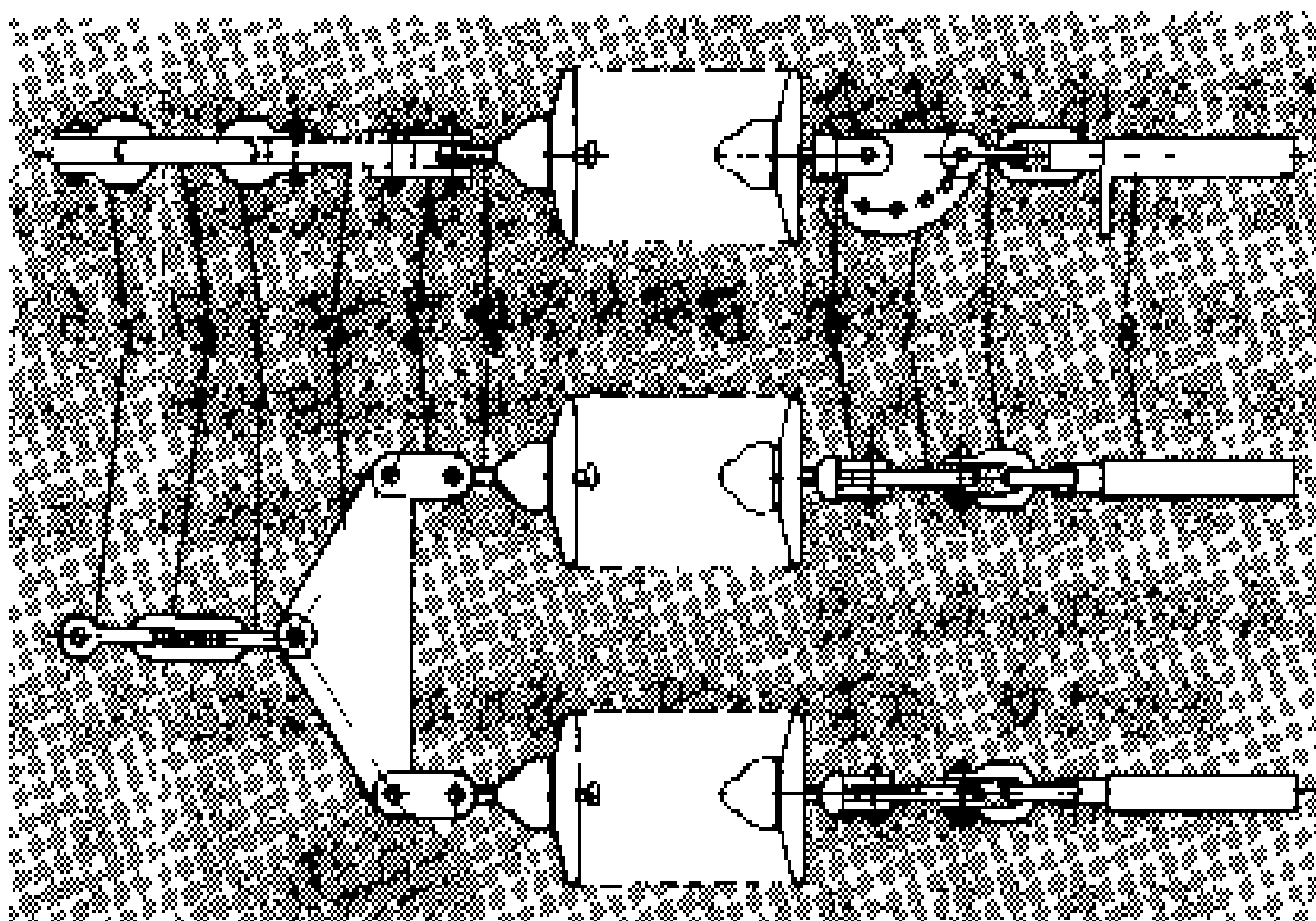


图 6 耐张绝缘子金具组合串  
1—U 形环; 2—延长环; 3—联板; 4—平行挂板; 5—球头挂环; 6—碗头挂板; 7—调整板; 8—耐张线夹

**无张力接续金具** 用在不带张力的导线上,只负责接通电流的金具,如变电所软母线上引下线用的 T 型线夹、耐张型杆塔上跳线连接用的跳线线夹和并沟线夹、变电所电气设备端子连接用的设备线夹等。

接续金具和耐张压接管都是靠金具本身传送电流的,接触面的电腐蚀和热稳定问题最为重要,解决的方

法,首推耐温导电复合脂的应用,以阻止空气和水分进入接触面,防止接触面的电腐蚀和氧化。其他措施是:设法保持接触面上有足够大的挤紧力(如在螺栓上加装碟形弹簧),但单位面积上的压力又不能太大。为防止导致大的蠕变,压力应不超过  $60\text{N/mm}^2$ ,因而要有足够的接触面积。增大接触面也降低了电流密度,限制了温升。根据经验,运行温度不超过  $80^\circ\text{C}$  时可在相当长的时期内保持接触面不松弛。

**保护金具** 改善或保护导线以及绝缘子金具串的机械与电气工作条件的金具。有机械保护金具和电气保护金具两类。

**机械保护金具** 安装在导线上对导线作机械性质保护的附属器件均为机械保护金具。机械保护金具有防微风振动金具、间隔棒和防舞动金具三种。

(1) 防微风振动金具。有防振锤和护线条。1925 年美国采用斯托克布里奇防振锤,简称防振锤,以其可靠

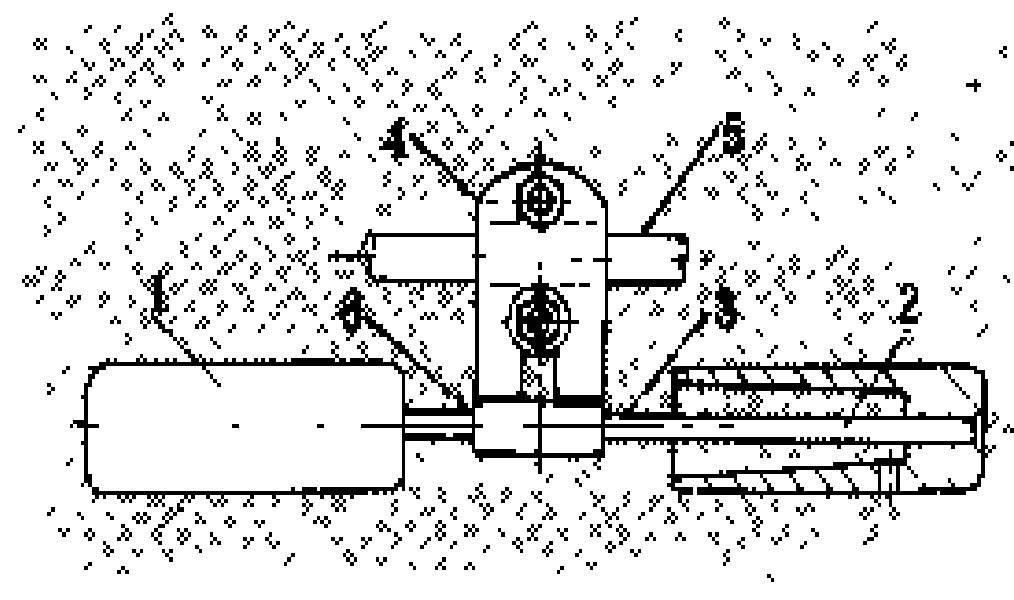


图 7 防振锤

功效和简单结构得到全世界推广应用,图 7 所示为标准的防振锤。

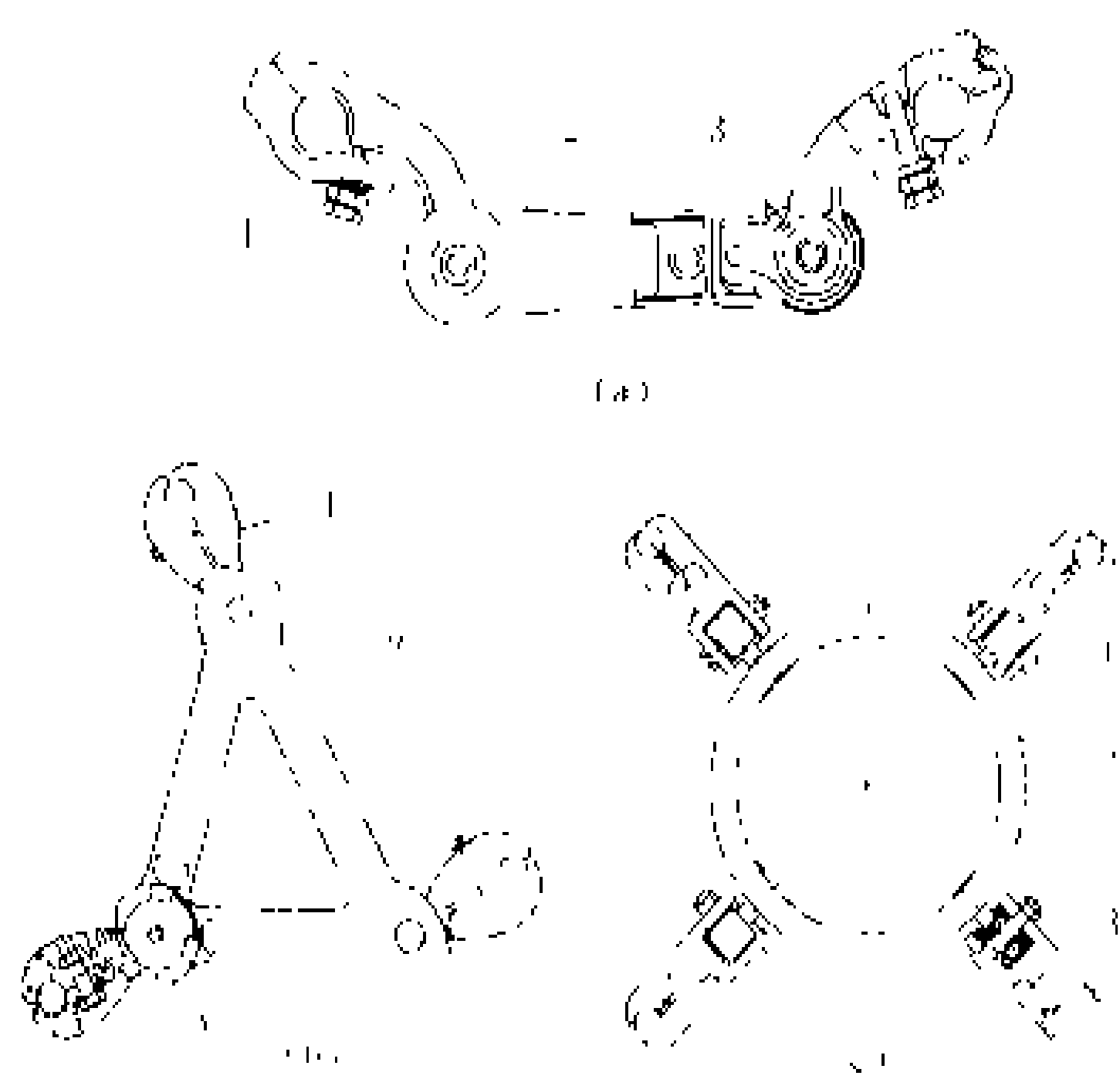


图 8 间隔棒

(a) 二分裂间隔棒; (b) 三分裂间隔棒;  
(c) 四分裂间隔棒  
1—线夹; 2—框架; 3—橡胶垫

防振锤的锤头一般有两种运动形式,一种是锤头绕吊索固定点跃动,另一种是锤头绕本身重心旋转,因此防振锤有两个谐振频率。防振锤通常安装在线夹附近,当微风引起的导线振动频率与锤头的任一谐振频率接近时,便产生共振。锤头运动消耗的功率起到抑制

导线振幅和消振的作用。近几年,在原有防振锤的基础上,又已研制出了许多改进型的防振锤,可以概括为两个方面:一方面是增加谐振频率的个数,如意大利的 4-R 型和澳大利亚的变

节距型防振锤,将谐振频率增为 4 个,芬兰的哈罗型防振锤将谐振频率增为 5 个;另一方面则是利用导线振动时的扭转作用来产生防振锤的扭转运动,如加拿大的扭转式防振锤。日本的防振环和澳大利亚的

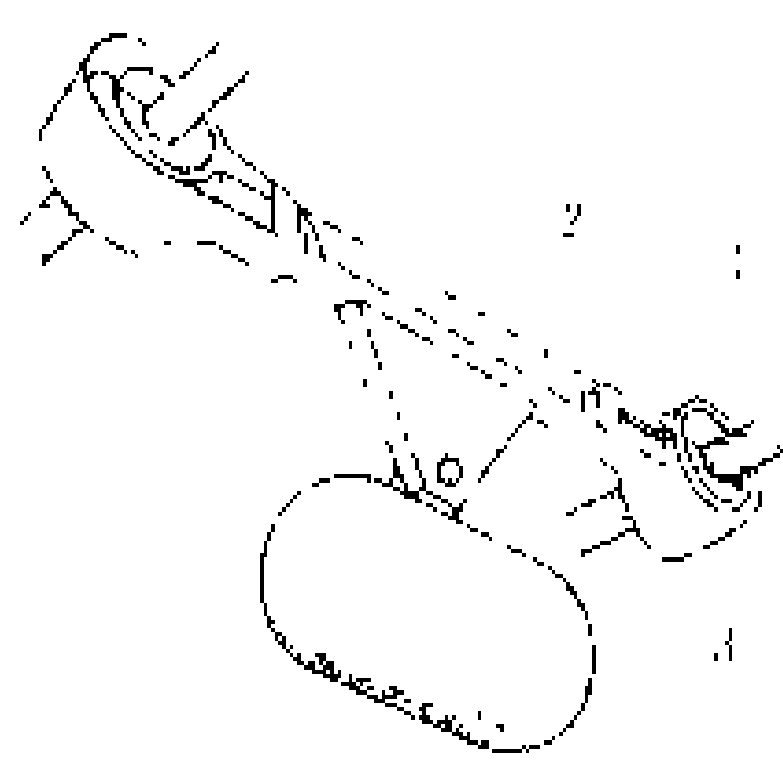


图 9 失谐摆锤

狗骨头防振锤则兼有导线的上下运动和扭转运动,其频率覆盖面和消振功率都胜过原来的防振锤。

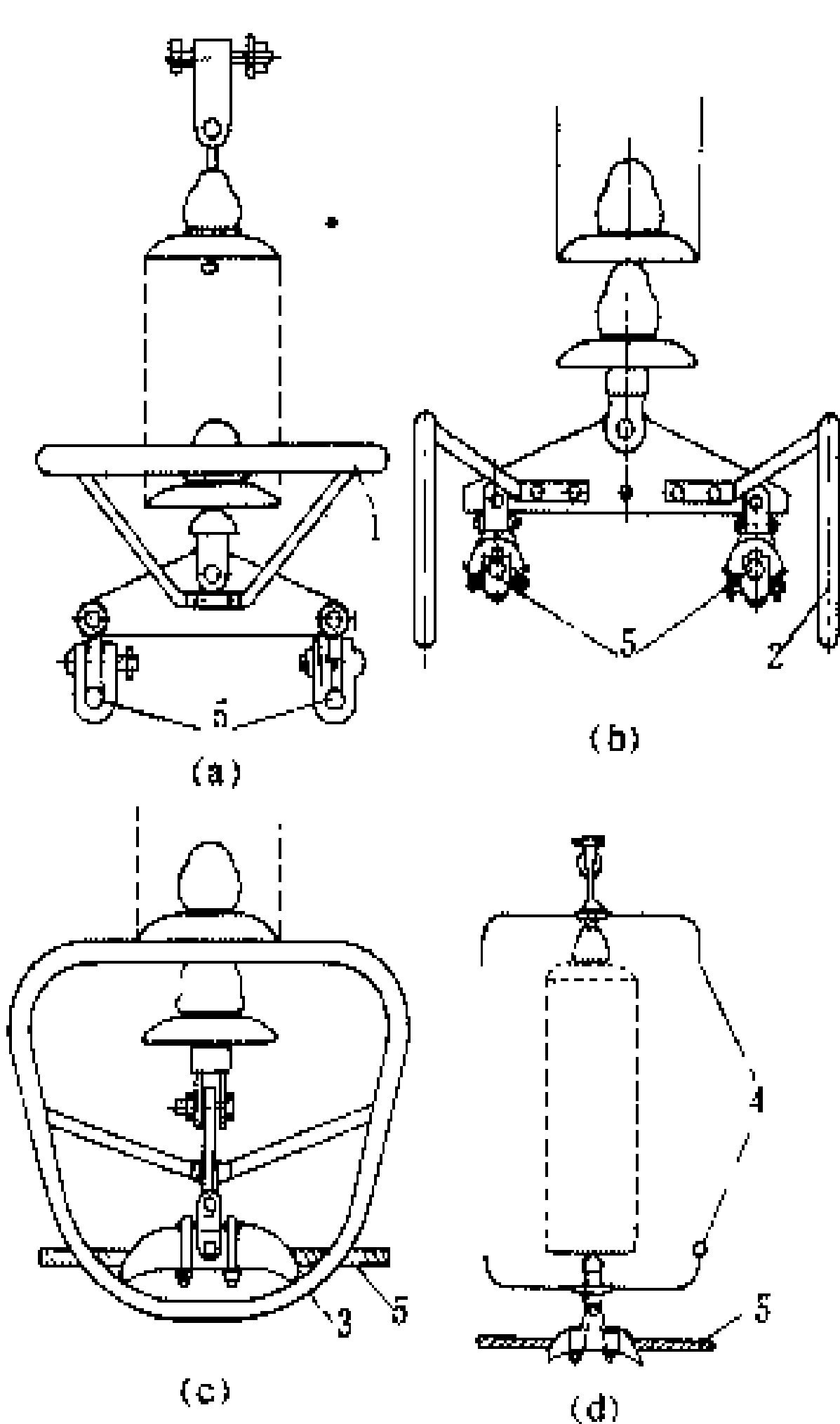


图 10 几种电气保护金具

(a) 均压环; (b) 屏蔽环; (c) 均压屏蔽环;  
(d) 招弧角

1—均压环; 2—屏蔽环; 3—均压屏蔽环; 4—招弧角;  
5—导线

护线条是包缠在线夹处导线外面的条状金具。它用加强导线刚度的方式来达到减小导线受到的动弯应力,从而提高导线的耐振能力。美国学者还发现,护线条也能将导线振幅抑制 20% 左右,而设计正确的防振锤却能抑制 80% 以上。在已经装有防振锤的线路上再装护线条,可使防振效果进一步加强。护线条有锥棒式和预成形式两种,锥棒式的需用特制工具将其绞拧在线夹处导线表面上,预成形式的则可以用手工顺螺

旋形将其绞拧在导线表面上。

(2)间隔棒。安装在分裂导线上固定和保持各分裂导线间的间距,以防止导线互相鞭击的金具。间隔棒一般安装在档距中间,相隔数十米安装一个。图 8 所示为用于二分裂、三分裂、四分裂导线的间隔棒结构示意图。对间隔棒的主要要求是:线夹须有足够的握力,且在长期运行中不允许松动;整体强度须能耐受线路短路时各分裂导线的向心力和在长期振动下的疲劳。相邻间隔棒之间的距离称为次档距,当水平排列的背风侧子导线处在迎风侧子导线背风面所形成的旋涡尾流中时,子导线之间可能产生扁椭圆形轨迹的次档距振荡。为抑制这种振荡和微风振动而研制出的阻尼式间隔棒,在其关节处装有橡胶垫。没有这种橡胶垫的则为刚性间隔棒。图 8 所示均为阻尼式间隔棒。参见彩图插页第 7 页 24 图。

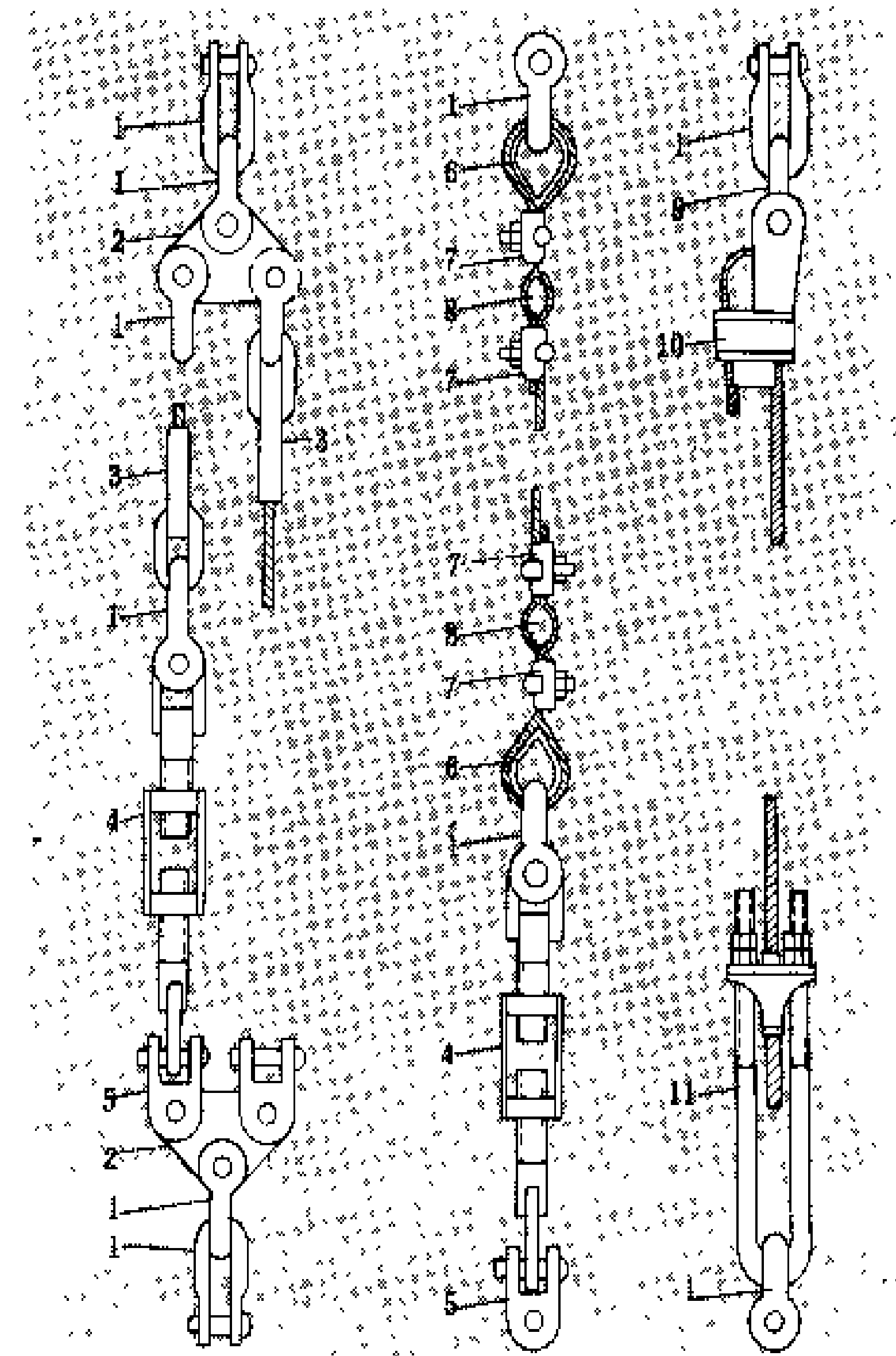


图 11 拉线组合串

1—U 形环;2—联板;3—耐张压接管;4—花篮螺丝;5—直角挂板;6—心形垫环;7—线卡子;8—垫块;9—直角挂环;10—楔型耐张线夹;11—可调楔型耐张线夹

(3)防舞动金具。防止导线单侧覆冰而产生的大幅度舞动的金具。导线的这种大幅度舞动破坏性很大,常会导致相间短路和损坏绝缘子串。目前世界上还没有找到一个成熟的对策,国外使用较多的防舞动金具有失谐摆锤,其次如偏心重锤、阻扭型防舞动器、风阻尼器、片状防舞动器和相间间隔棒也有采用。失谐摆锤的

构造如图 9 所示。其原理是使覆冰导线的扭转频率偏离垂直振动频率,以避免共振而导致导线舞动。

电气保护金具 从电晕和沿面闪络的角度对绝缘子金具串进行保护的金具。如保护环(包括均压环、屏蔽环、均压屏蔽环)和招弧角。均压环的作用是使绝缘子串上的电压分布趋于均匀;屏蔽环的作用是使线夹和连接金具不产生可见电晕;均压屏蔽环则是均压环和屏蔽环的合并。招弧角的作用是使发生闪络时的电弧远离绝缘子表面。图 10 所示为几种电气保护金具的结构示意图。

拉线金具 由杆塔至地锚之间连接、固定、调整和保护拉线的金属器件。目前拉线材料均为镀锌钢绞线,拉线组合串如图 11 所示。图中的心形垫环为保护拉线用,花篮螺丝、可调楔型耐张线夹和 U 形螺栓的螺帽为调整拉线松紧用,线卡子与垫块组合、楔型耐张线夹和耐张压接管均为固定拉线用,U 形环和联板等为连接用。国外拉线金具的发展趋势,出现了以护线条式的钢预绞丝来固定拉线的方法。

参见彩图插页第 7 页 26 图。

参考书目

程应镗,送电线路金具的设计安装试验和应用,北京:水利电力出版社,1989

(程应镗)

jiakong shudian xianlu kekaoxing

架空输电线路可靠性 (reliability of overhead transmission line)

架空输电线路经受电气、机械作用而保持其输电功能的能力量度。架空输电线路的主要组成部件有杆塔基础、杆塔、导线(包括架空地线)和绝缘子等。输电线路发生中止其输电功能的主要故障,有导线断裂、杆塔折断或倾倒、绝缘子脱落或断裂。至于导线因过热而弧垂增大导致对地放电,或因污秽而使绝缘子闪络,或因雷击而使导线与绝缘子击穿,也会使输电功能中断,但这大都是瞬时性故障。自动重合闸的应用,可使这类瞬时性故障迅速消除,不造成架空输电线路停运事故。而且,由于这类瞬时性电气故障修复比较容易,故障对线路的损伤不大,故在整个电力系统的绝缘配合中,架空输电线路的绝缘水平是最低的。

架空输电线路的设计、施工和运行维护是保证线路可靠性的三个主要环节。

目前,架空输电线路的设计一般都采用安全因素法,即按给定的电气、机械强度要求考虑一定的安全因素来设计。1986 年,国际电工委员会(IEC)提出了架空输电线路荷载与强度的建议。建议中要求按概率统计原理,对线路设计进行可靠性检验,并提出了线路可



可靠性为 90% 的要求。这是架空输电线路可靠性的第一个有明确目标的建议，目前正处于推广阶段。

架空输电线路施工对可靠性的影响，在于架线工艺、导线损伤、杆塔用材与加工，以及杆塔基础的施工质量等方面。

架空输电线路的维护，包括线路本体的维护和线路通道的维护两方面。线路本体维护如涂漆、防锈、杆基监护、绝缘子损伤的监测和更换等；线路通道维护则主要是通道内杂生植物的清除与安全防护等。

中国和工业发达国家一样，对架空输电线路进行可靠性统计工作。统计的主要指标是故障率和可用系数。

故障率的计算公式为

$$\text{故障率} = \frac{\text{统计期间被统计线路的故障次数}}{\text{被统计线路的长度} \times \text{统计年数}},$$

次 / (百公里 · 年)

可用系数的计算公式为

$$\text{可用系数} = \frac{\text{被统计线路的可用小时数}}{\text{统计期间小时数}} \times 100\%$$

这些指标均为大范围的平均值。

(费翔群)

jiakong shudian xianlu sheji kance

**架空输电线路设计勘测** (survey and exploration for overhead transmission line design)

为交直流架空输电线路设计阶段进行的工程勘测。按其工作阶段不同，可分为初步设计阶段勘测（简称初勘）和施工图设计阶段勘测或最终勘测（简称详勘或终勘）。对特别重要或非常复杂的线路，为进行投资决策的技术论证，在初勘前还有可行性研究阶段勘测。初勘的主要任务是选线，即根据室内图上选线，通过现场踏勘和重点仪器勘测，做好路径方案比较选择，查明地貌、地物、地质、水文、气象等条件，为编制初步设计提供勘测报告和有关基础资料。详勘的主要任务是根据批准的路径方案进行详细仪器勘测，取得勘测成果，为编制施工图设计提供勘测报告和有关技术资料。按勘测发展阶段不同，可分为传统方法勘测和现代方法勘测。现代方法主要应用了航空遥感、全球卫星定位系统（GPS）、全站型仪器、数字地面模型（DTM）和机助测图等技术。按勘测作业方法不同，可分为常规方法勘测和航空遥感方法勘测。

**常规方法勘测** 勘测内容包括测量、地质、气象、水文等方面。常规方法勘测工作程序一般为接受任务、准备工作、野外作业、整理资料、编写勘测报告等。

**测量工作** 初勘时，对影响线路路径的地物、地貌

进行调绘，在协议区、大跨越区的地形复杂地段，必要时用仪器定线落实路径，测绘平面图或平面、断面图。详勘时，测量工作有定线测量、中心线测量、平面测量、断面测量、平面及高程联系测量、杆塔定位测量等内容。

(1) 定线测量。根据批准的路径方案，将输电线路的起点、终点、转角点和方向点在实地用标桩固定的测量工作。分直接定线和间接定线两种方法。直接定线是在现场踏勘测定；间接定线是按照设计的坐标或距离根据大地控制点或其它固定标志，用经纬仪或光电测距仪测定。根据定线测量的结果，将路径准确地绘制在路径方案图上，供编制设计文件之用。

(2) 中心线测量。也称导线测量，即测量输电线路中心线上桩间的距离、高差和转角点（方向点）与其前后相邻的转角点（方向点）的水平角，以建立起平面、高程控制点，供平面测量、断面测量、交叉跨越测量和定位测量之用，一般用经纬仪或光电测距仪施测。

(3) 平面测量。利用平面、高程控制点，采用极坐标法或支距法测量输电线路经过地段有关的交叉跨越、平行接近的各种地物、地貌特征点的坐标和高程，常用经纬仪或光电测距仪施测。

(4) 断面测量。对一定方向剖面的地面起伏状况进行的测量工作。包括中线下纵断面测量、边线下纵断面测量、风偏横断面测量和接近电线最短距离的危险点测量。常用经纬仪或光电测距仪施测。根据中心线测量、平面测量、断面测量的结果绘制输电线路平面、断面图。

(5) 平面及高程联系测量。输电线路的起点点要与变电所取得统一的平面和高程关系。输电线路通过或接近城市、工矿、重要设施或其他协议地区，须取得统一坐标时，要进行平面联系测量。输电线路跨越河流、湖泊、水库、淹没区及河网地段时，跨越规划铁路、公路、管道等建筑设施时，根据需要进行高程联系测量。为了征购土地，取得协议，计算危险、干扰影响，做好保护设计，须进行相对位置的联系测量。按不同要求采用经纬仪、光电测距仪或水准仪施测。

(6) 杆塔定位测量。按照设计排定的杆塔位置与相邻控制点的距离和高差，用经纬仪或光电测距仪对杆塔中心用标桩在实地测定，以供施工使用。必要时，还要测量（杆）塔基断面图或地形图。

**地质工作** 初勘时，主要通过搜集资料、现场踏勘和重点勘探，为编制初步设计（即路径方案选择、线路工程地质分段评价和重大跨越杆塔基础设计）提供工程地质资料。详勘时，主要通过地质勘探与试验（包括坑探、钻探、物探、原位测试和土工试验），提供不同杆塔基础和接地装置设计所需要的地质资料和稳定性



评价资料。按地质条件复杂程度,地质勘测分为一般地质勘测和重点地质勘测两种。

(1)一般地质勘测。对地质条件、地貌单元简单地段的地质勘测。根据经验和采用坑探、触探、钻探、原位测试等勘探试验工作,对杆塔位置的地质状况进行逐基鉴定。按设计要求提供杆塔地基岩土的物理力学指标和工程地质、水文地质条件,如:地震基本烈度、岩土电阻率、冻结深度、地基容许承载力、基础稳定性评价;土的名称、状态、内摩擦角、凝聚力、容重、上拔角;地下水位、水的侵蚀性;岩石名称、岩性、构造、产状、风化程度、节理裂隙发育情况和利用岩石基础的可能性等。

(2)重点地质勘测。对特殊的地貌,岩溶、滑坡、泥石流、崩塌、冲沟等不良物理地质现象,软土、黄土、膨胀土、人工填土等特种岩土,大的或重要的交叉跨越以及采用特殊设计和特殊基础的区段或地点的地质勘探。重点地质勘测采用地质测绘、钻探、物探、原位测试和土工试验等方法进行。除按设计要求提供一般地质勘测的物理力学指标,工程地质、水文地质条件和杆塔基础地质柱状图或剖面图外,还要针对各种特殊条件以及为处理不良地质问题采取技术措施,分别提供相应的勘探、测试和评价资料,如:静力或动力触探,载荷试验,三轴剪力试验,十字板剪切试验,振动波速测试,残余抗剪强度试验,孔隙水压力测试,桩基容许摩擦力试验,以及边坡稳定、河床质分析等资料。对直流输电线路还须提供接地电极地区的电阻率、热导率、热容率、温度和含水量等大地特性资料。

气象工作 获取重大荷载及防雷、防电晕等设计气象条件,为编制设计文件和技术鉴定提供基础资料。查勘项目有沿线不同地段的大风、重冰、降水、雷电、气温、气压、日照和空气密度等。气象资料主要向有关气象部门搜集,野外工作的重点是大风、重冰调查和重冰观测。

(1)大风调查。对输电线路经过地段曾发生过8级以上大风的调查。通过搜集资料、现场踏勘和社会访问,查明大风的类型、发生的时间、地点、路径、风速、风向、频率、瞬时风速变化和受灾情况等,以便分析计算在一定重现期、一定时段、一定高度和一定方向条件下的设计基本风压。

(2)重冰观测。对输电线路经过地段架空线上覆冰厚度大于一定数值(中国定为20mm)的典型地点,在模拟线或现有输电线上进行观察和测验工作。通过短期观测,同附近有长期观测资料的台、站建立相关关系,以确定在一定重现期、一定高度、一定线径、一定方向条件下的架空线覆冰厚度或单位长度的覆冰重量。观测主要项目有覆冰过程、类型(雾凇、雨凇、湿

雪、混合冻结物等)、形状、单位长度的覆冰重量和相应的气温、气压、风向、风速、湿度、天气现象等。

水文工作 对输电线路跨越的河流、湖泊、海峡、海湾和现有或拟建的水库、渠道、新开河、分洪区等水域进行的水文勘测工作。初勘时,主要通过搜集资料和现场查勘,提供线路沿线各段历史最高洪水位、最高内涝水位、内涝范围与持续时间、漂浮物、流冰、河床演变以及水利规划等资料。对重要河流的跨越河段,还须论述河道主流变化、河滩演变、河床稳定性以及各种不利因素,为选择最佳路径方案提供资料。详勘时,经过调查测验和分析计算,确定对输电线路杆塔设计位置有影响的历史最高洪水位、设计洪水位、常年洪水位、航行时最高水位、流冰时最高水位、漂浮物、河床演变等。如在河中设塔,还要提供水深、漂浮物种类、流冰尺寸与相应的最高水位及最大流速、流向和塔基冲刷深度等资料。若输电线路跨越海峡、海湾和感潮河流,确定洪水位时还要考虑潮位和风浪的影响。当输电线路通过水库下游时,则要确定溃坝洪水及溃坝的冲刷影响。水文调查的主要工作有河床演变调查、历史洪水位调查。水文分析计算的主要工作有设计洪水位确定和杆塔基础冲刷计算。

(1)河床演变调查。在水流与河床互相作用下的河道形态的变化称为河床演变。它是河道形成和发展的整个历史过程。由于河床受内力和外力的作用,特别是水能变化和水流侵蚀作用,使河床永远处于不停息的变迁中。河床演变按形态不同可分为纵向变形和横向变形,两种变形对杆塔基础安全都有很大影响。河床演变调查就是对输电线路跨越河段通过实地查勘、测量、搜集资料和访问等方法,查明河床的历史和现实状况,分析今后可能变化的趋势,为选择合理的路径和杆塔位置提供资料。

(2)洪水位调查。对无资料或短缺资料地区确定洪水位的一种主要方法,其目的是根据历史或近期(包括当年)发生的洪水情况,推算设计洪水位,以满足工程建设和运行的需要。调查内容有洪水痕迹、洪水发生时间、重现期、洪水持续时间、洪水形成的原因(如暴雨、凌汛、融雪、山体崩塌、溃坝等)以及近年变化趋势等。通常采用的调查方法主要有实地访问和历史文献搜集、考证等。

(3)设计洪水位确定。设计洪水位指设计拟定的带有出现频率或重现期的、符合设计标准的洪水位。输电线路的设计最高洪水位常取重现期为100年,即出现频率为1%。确定设计洪水位的计算方法有三种:①有长系列洪水位资料时,采用年极值法(从每年洪水位中选取一个最大值),按数理统计的计算方法,求得设计

洪水位。②只有短系列洪水位资料时,尽可能地通过相关分析,同有长系列资料的站点建立相关关系,插补延长短系列洪水位资料,再按数理统计方法求得设计洪水位。③无洪水位资料时,一是通过洪水调查求得设计洪水位;二是根据设计暴雨,通过产流、汇流计算推求洪峰流量,再经水位-流量关系曲线求得设计洪水位;三是通过相似流域建立类比关系,依据流域面积、洪峰流量、计算断面面积、河床糙率、河床比降等因素推算设计洪水位。

(4)杆塔基础冲刷计算。杆塔基础立在河流中受水流冲刷深度的计算。包括三部分:河槽自然演变冲刷、杆塔基础压缩河槽所引起的一般冲刷和杆塔基础周围的局部冲刷。总冲刷深度为上述三部分冲刷的组合。

**航空遥感方法勘测** 主要有航空摄影测量和遥感方法勘测。它是按照摄影测量和遥感的原理和方法,利用航摄像片丰富的信息,经过野外工作和室内处理,以取得各专业在选线、定位中所需要的全部或部分勘测资料。

**测量工作** 架空输电线路航空摄影测量简称输电线路航测。其内容一般包括资料搜集、踏勘、选线、航空摄影、航测外业、航测内业、放位、检验和资料整理。

(1)航测选线。分为航空载人目视选线和航摄像片选线两种。航空目视选线是利用航空飞行器和观测与记录设备,对照地形图、航摄像片,从空中通过目视观测,鸟瞰输电线路路径经过地区的地物、地貌,以选择线路路径走向、转角点和重要交叉跨越点的概略位置,同时进行摄影、录像。航空目视选线一般用于可行性研究或初勘工作中。航摄像片选线简称航片选线,是利用航摄像片在立体镜或判读仪下观测立体模型,进行反复比较,选出线路路径,将线路的起点、终点、转角点和方向点用刺点设备准确地刺到航摄像片上。通常在初勘时,根据室内选线在地形图上标定的路径,同航摄像片相互比较,选出合理路径方案。详勘时,根据批准的路径方案和工程要求,在大比例尺航摄像片上进行选线。

(2)航空摄影。当线路通过地区缺乏航摄像片,或虽有像片但比例尺过小、时间较久或地物、地貌变化较大时,在线路路径基本确定后,可进行专门的航空摄影。

(3)航测外业。包括野外控制测量、调绘和放线(定线)。野外控制测量包括基础控制测量和像片控制测量两部分,使用的仪器有光电测距仪、GPS等。调绘需在充分搜集资料的基础上进行,要满足线路路径选择和平面、断面图成图的需要,一般采用室内判绘与野外调绘相结合的方法。放线是严格按航摄像片所选的路径,在现场判读明显地物点,用距离交会法或测距

法定出转角点或方向点的平面位置。

(4)航测内业。包括像片镶嵌、选点刺点、量测、电算和测图。测图方法主要有三种:①精密立体测图仪测图。采用模拟式精密立体测图仪,其成果为线划图。②解析测图仪测图。全套仪器由高精度的立体坐标量测仪、电子计算机、数控绘图桌、相应的接口设备和伺服系统组成,其成果为数据或图形。③计算机辅助测图系统测图,即机助测图。整个系统构成和测得的成果与解析测图仪的基本相同,只是数据采集还包括模拟式立体测图仪。前一种方法实现了自动制图,但测线需手工改编,如采用计算机辅助设计CAD,则需对线划图进行数字化处理。后两种方法实现了机助测图,并可建立DTM,其成果既能满足手工排位要求,同时都为CAD提供了条件。随着电算、影像相关、正射投影等技术的发展和仪器价格的降低,全自动数字测图仪不久将在输电线路勘测中得到应用。

(5)航测放位与检测。航测放位也称航测定位。根据设计人员在平面、断面图上所排定的杆塔位置,在实地用标桩逐一固定。可采用经纬仪、光电测距仪或GPS等仪器,根据测量控制点或明显地物点放位。放位后立即对档距、高差、水平角、重要交叉跨越和平行接近的地物、危险点的安全距离进行检测。

**地质工作** 输电线路航空工程地质主要利用航空目视和摄影资料的判释和调绘的成果,对照地质图和地形图,分析研究输电线路经过地区的地质构造、地貌、岩土和滑坡、崩塌、岩溶及泥石流等不良物理地质现象分布,为选线提供地质测绘资料。

**气象工作** 输电线路航空工程气象主要用于初勘选线。利用摄影资料结合地形图和气候图分析重要天气形势下的冰雪覆盖、云雾分布、植被损坏、大风路径等情况。一般采用航空目视以及航摄资料判释和调绘,对输电线路经过地区的气象条件进行分段,为选线和技术鉴定提供气象资料。

**水文工作** 输电线路航空工程水文主要利用航空目视以及摄影资料的判释和调绘的成果,根据航测平面图、地形图、水文特征点的平面坐标和高程资料,分析研究河流形态、河床演变、主槽摆动、水流方向和地面水淹没范围等。若保留有历史航摄像片,可以重叠对照,对河床演变作出纵向和横向变形的定量分析,为选线和技术鉴定提供水文资料。

#### 参考书目

- 东北电力设计院勘测室编辑小组,架空送电线路勘测,北京:中国工业出版社,1964
- 王沛,输电线路水文气象勘测方法,北京:水利电力出版社,1986

(熊龙飞)

jiakongxian

**架空线** (conductors & wires of overhead transmission line)

在电力系统中架空敷设的用以输送电力的导线和用以防雷的架空地线的统称。架空线具有低电阻和高强度的特性,以减少运行时的损耗和承受线路上动态和静态的机械荷载。同时,架空线还具有耐大气腐蚀和耐电化学腐蚀的能力。

最常用的架空导线有铝绞线、钢芯铝绞线、铝合金绞线和钢芯铝合金绞线等。早在1895年法国就首先使用了铝线作为架空导线,美国在1909年第一次采用了钢芯铝绞线,中国自20世纪60年代以来,也先后研制开发了铝合金线、铝包钢线、大跨越导线、电站用软母线和自阻尼导线等新产品。一般来说,架空输电线路选用强度较高的导线,如钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线等,而配电线路则可选用铝绞线。重冰区或大跨越线路可选用钢芯铝合金绞线或钢芯铝包钢绞线。此外,高海拔地区的架空输电线路或变电所中也可选用扩径导线,以减少导线电晕。大容量的架空输配电线路可选用耐热铝合金绞线。自阻尼导线可提高导线的抗振能力和使用应力。一般的电力线路采用单根导线,220 kV以上的超高压、特高压输电线路,采用2根以上的分裂导线。分裂导线与等截面的单根导线相比,具有载流能力大、表面场强小等优点,可减小电晕损失和无线电干扰,并能提高系统的稳定性。

在一般输电线路上,架空地线常采用镀锌钢绞线。在330 kV及以上超高压输电线路路上,为了降低线路的工频过电压,减小潜供电流和改善对邻近电信线路的危险影响,或使架空地线兼作高频载波通道,也可选用铝包钢绞线、钢芯铝合金绞线或高强度钢芯铝绞线。20世纪70年代以来,又研究开发了光纤组合地线,可进一步扩大电力系统的信息传输容量。

**结构型式** 架空线按其结构型式不同可分为简单绞线、组合绞线和特种绞线三种。

**简单绞线** 由材质相同线径相等的线材绞制而成,如铝绞线、铝合金绞线等。可由7、19、37、61或91根单线构成,由内至外逐层绞制,相邻层绞向相反,最外层绞向为右向。

**组合绞线** 由导电部分的线材和增加强度的芯线组合绞制而成,如钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线等。

**特种绞线** 由不同材质或不同形状的线材,用特种组合方式绞制而成,如扩径导线、自阻尼导线等。

**性能及用途** 架空线的主要品种有铝绞线、铝合金绞线、耐热铝合金绞线、钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线、钢芯铝包钢绞线、扩径导线、自阻尼导线、防冰雪

导线、小弧垂导线、光纤组合导线及地线、镀锌钢绞线等,它们的性能和用途也各有不同。

**铝绞线** 由规定型号的硬圆铝线绞制而成。其强度较小,不能承受大的外力。主要用于档距不大、受力较小的配电线路。中国铝绞线的截面范围为16~800 mm<sup>2</sup>。根据特种需要,可制造截面为1500 mm<sup>2</sup>及以下的铝绞线。用来制作铝绞线的铝线中铝的含量不低于99.5%,杂质铁的含量不大于0.30%,硅的含量不大于0.22%,杂质总和不大0.50%。杂质含量高,导致铝线电阻率大,但其强度略高。

**铝合金绞线** 由铝合金圆线绞制而成,其结构与铝绞线相同。铝合金圆线主要有热处理型和非热处理型两种。铝镁硅合金是热处理型的代表产品,早在1921年瑞士就研究开发了这种导电用合金,其化学成分为:铝98.7%、镁0.5%、硅0.5%,其余为杂质。通过淬火和时效处理,可析出强化相Mg<sub>2</sub>Si,使合金的机械强度显著提高。非热处理型铝合金有美国的5005铝镁合金,含镁量约0.8%,其余为铝和杂质。非热处理型铝合金产品制造工艺条件较简单,但机械强度和伸长率较小。

**耐热铝合金绞线** 由耐热铝合金圆线绞制而成。在铝中添加锆0.13%以下、稀土金属0.5%以下,在合金固溶体中形成Al<sub>3</sub>Zr,可将合金的再结晶温度提高到315℃,并能使晶粒细化。随着添加微量元素的差异和加工条件的不同,耐热铝合金圆线有许多品种,允许使用温度高达150℃以上,可大大提高线路的载流能力。耐热铝合金绞线可用在导线截面选择受发热条件限制的情况下,也可作变电所中载流4000 A以上的大电流母线,或用在城市电力网改造中要求增大容量的线路上。

**钢芯铝绞线** 由硬铝线和镀锌钢丝组合绞制而成,是电力线路最常用的导线。钢芯铝绞线的结构常用铝线根数/钢线根数表示,钢铝比(钢截面/铝截面)愈大,导线强度愈高。除一般的钢芯铝绞线外,还有防腐钢芯铝绞线,它主要用于沿海或腐蚀严重的化工地区。钢芯铝绞线的交流电阻除与电阻率等因素有关外,还与导线结构有关,单层铝线的交流电阻最大,三层铝线的次之,两层铝线的最小。钢铝比愈大,交流电阻也愈大。超高压输电线路用的分裂导线以采用钢铝比小的钢芯铝绞线为宜,这样可节约钢材,降低线路造价。

**钢芯铝合金绞线** 由铝合金线和镀锌钢丝组合绞制而成。由于铝合金线的强度较高,伸长率较大,所以钢芯铝合金绞线的机械过载能力也较大,可用作大跨越导线、重冰区导线或架空地线。国外最大的钢芯铝合金绞线的截面达2860 mm<sup>2</sup>,外径76.5 mm。中国钢芯

铝合金绞线截面的制造范围为  $10 \sim 1000 \text{ mm}^2$ , 连续最高使用温度达  $90^\circ\text{C}$ 。钢芯耐热铝合金绞线的使用温度可达  $150^\circ\text{C}$ , 可提高载流能力, 也可用作大电流软母线。

**钢芯铝包钢绞线** 由铝包钢线及镀锌钢丝组合绞制而成。它具有强度高、弧垂特性好和耐腐蚀等优点, 主要用作大跨越导线, 可降低大跨越杆塔高度, 节约工程造价。20 世纪 60 年代初期, 日本的本州与四国间的大跨越导线就采用了 AS-170 型钢芯铝包钢绞线。中国 1976 年建成并投运的南京长江大跨越线路, 采用了 GLGJ-140/420 型钢芯铝包钢绞线, 其截面示意如图 1 所示。1984 年又研究开发了 GLGJ-210/360 型高强度钢芯铝包钢绞线。铝包钢圆线可用纵包法、挤压法或粉末冶金法制造, 中国主要采用前两种方法。

**扩径导线** 将导电线材用支撑法或填充法使其外径扩大的导线。在海拔地区或超高压、特高压输电线路采用扩径导线, 可降低导线表面的场强, 减小电晕损失和无线电干扰, 并能减小电晕噪声。图 2 所示为 LGJK-800 型软母线, 在钢芯与铝线间, 用两层每层各 4 根铝线反方向相绞, 以支撑外部铝线, 从而使导线外径显著增大。扩径导线与实心导线相比, 可节约大量有色金属, 能降低线路造价。中国 1972 年在  $330 \text{ kV}$  输电工程中, 采用了 K-272 型扩径导线和 KKZ-51 型扩径空心导线, 1979 年研究开发了 LGKK-900、LGKK-1400

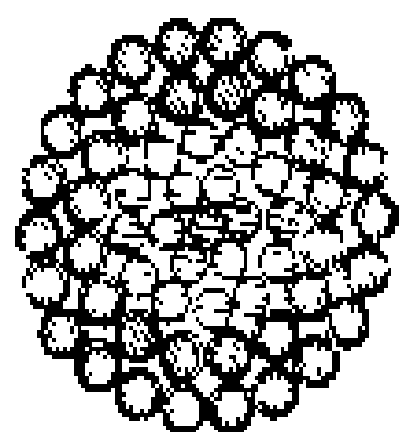


图 1 GLGJ-140/420 型钢芯铝包钢绞线

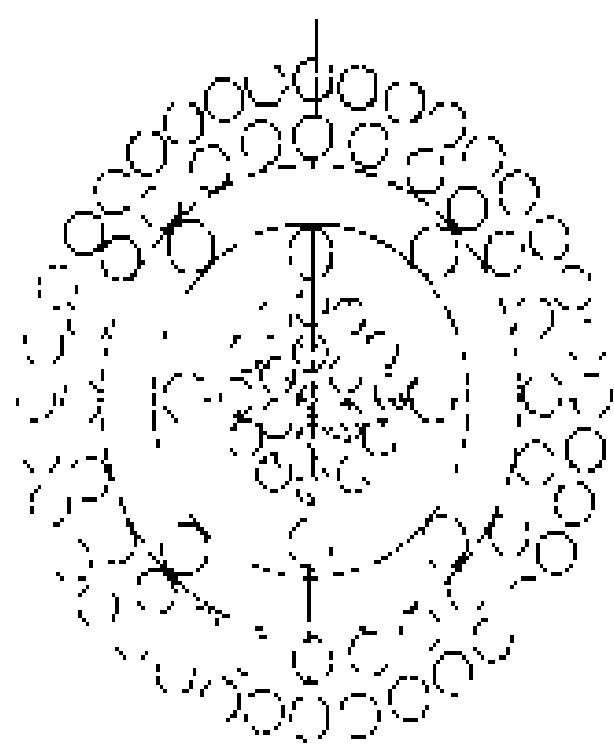


图 2 LGJK-800 型软母线

型和 LGJQT-1400 型电站用软母线, 1988 年又研究开发了 LGJK-630、LGJK-800、LGJK-1000 及 LGJK-1250 型  $500 \text{ kV}$  电站用新型系列软母线, 长期使用温度达  $80^\circ\text{C}$ 。

**自阻尼导线** 能够自身消耗风激振动能量的导线。这种导线的结构特点是, 在层与层间留有一定的间隙, 使各层成为各个独立的单元, 在导线受风力激振时, 由于钢芯和各层铝线的固有振动频率各不相同而相互干扰碰撞, 可达到阻尼减振的效果。为了使层与层间形成间隙, 一般将铝线作成拱形, 如图 3 所示。自阻尼导线与一般钢芯铝绞线相比, 可提高使用应力到拉断力的  $60\%$ , 并可减少导线的疲劳断股现象, 因此可加大线路档距, 减少杆塔基数, 或降低杆塔高度, 以节约线路投资。但自阻尼导线价格略高, 并需特殊的金具。加拿大和美国使用自阻尼导线较

多。中国 1984 年也研究开发了 LGJ/ZD-300 型自阻尼导线, 已在输电线路路上试用。

**防冰雪导线** 能自动融冰除雪的导线。它应用在重冰区的输电线路路上, 可避免由于导线覆冰或积雪过重引起的断线倒杆停电事故。日本对防冰雪导线的研究进行过大量的工作。防冰雪导线有指环式、居里合金式、切换电流式或涂料防冰式等多种型式。切换电流式防冰雪导线的工作原理是, 在导线的铝线与钢芯之间有一层耐老化的绝缘层, 在正常情况下, 电流通过铝线运行, 当气温下降到  $0 \sim 2^\circ\text{C}$ 、湿度约为  $80\%$ 、风速约  $0 \sim 3 \text{ m/s}$  构成覆冰条件时, 通过架设在杆塔构架上的传感器等电器元件, 将电流切换到钢芯上, 使钢芯发热融冰, 融冰后仍通过传感器等电器元件, 将电流再切换到铝线上, 恢复正常运行。

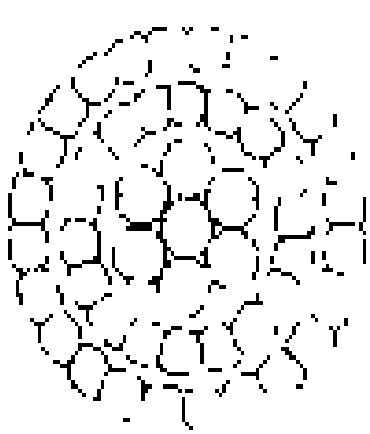


图 3 自阻尼导线

**小弧垂导线** 具有小的线膨胀系数, 载流时弧垂较小的导线。小弧垂导线主要有两种型式: 一种采用特种钢芯, 如采用铝包高强度殷钢芯, 这种钢芯在常温到  $230^\circ\text{C}$  之间的线膨胀系数为  $3.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。高强度殷钢含镍约  $3.6\%$ , 另加其它微量元素, 价格昂贵。日本在 1980 年用这种钢芯与特种耐热铝合金线组合绞制, 研究开发了 XTACIR 型倍容量导线, 载流可提高一倍。另一种是采用普通钢芯的型式, 但铝线部分要加以特殊处理。美国 1971 年研究开发了钢芯软铝绞线 (SSAC), 运行温度可达  $160^\circ\text{C}$ , 载流能力大大提高, 运行时铝线部分不受力, 机械荷载完全由钢芯承担, 导线的线膨胀系数即钢芯的线膨胀系数, 故弧垂较小, 还具有自阻尼性能良好的特点。日本 1975 年研究开发的 DLAC 弧垂抑制型导线, 用特殊的绞制方法使铝线产生  $0.3\%$  的永久变形, 导线运行时, 应力也全部由钢芯承担, 与普通的钢芯铝绞线相比,  $90^\circ\text{C}$  时的弧垂能减小  $10\% \sim 30\%$ , 耐振性能也好。

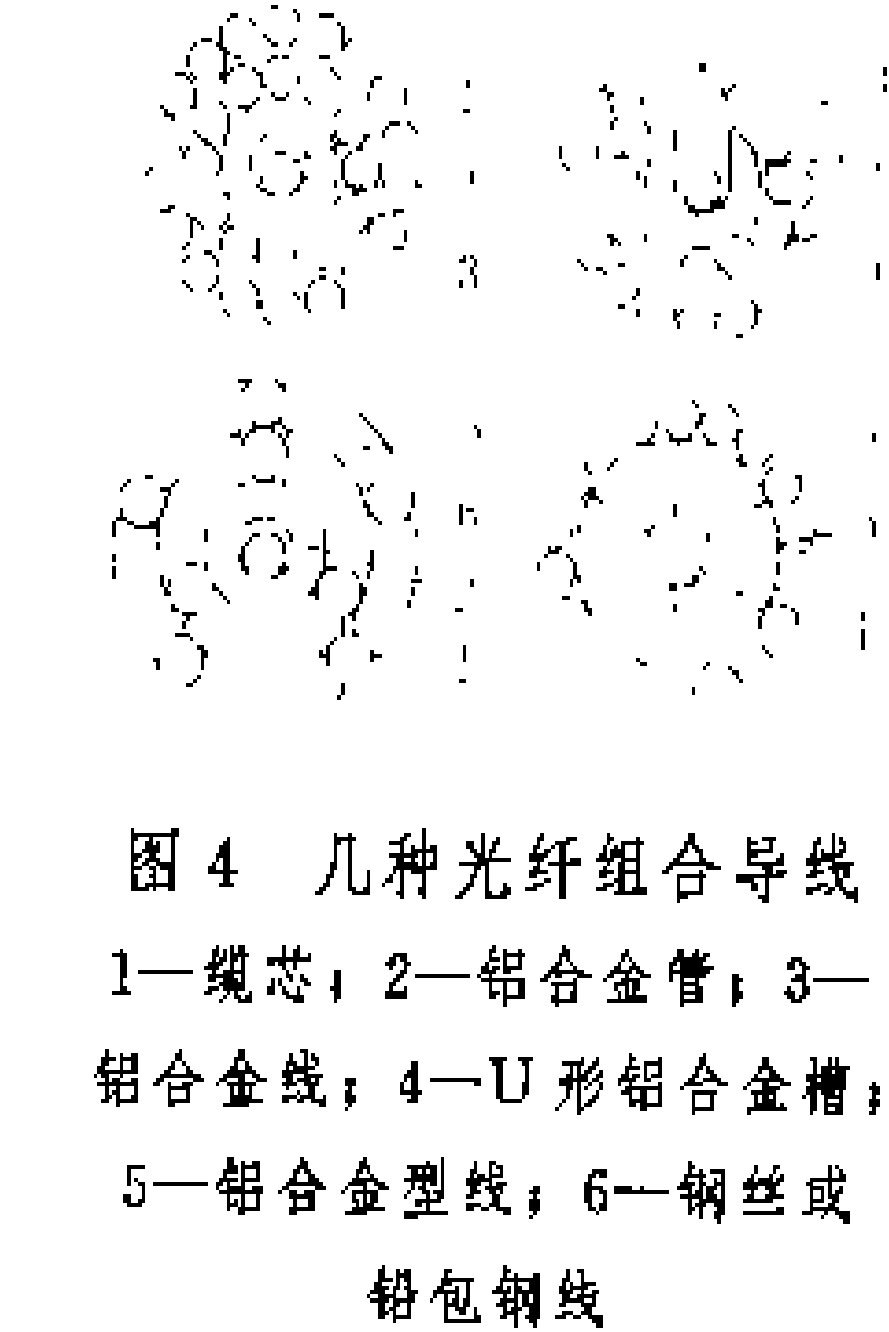
**光纤组合架空导线及地线** 由通信光缆、导体和加强的线材组合绞制而成。它具有传输信息容量大、衰减减小、工作频带宽、不受电磁干扰等优点。在高电压下, 可实现遥控、遥测、遥调等大容量信息传输。20 世纪 70 年代以来, 国外对电力网采用光缆通信技术, 进行了大量的研究, 要求光纤组合导线或地线具有传输信息稳定, 传输损耗小, 耐气候变化, 耐过电流热冲击和防潮防水等特性。

光纤组合导线的结构型式如图 4 所示。主要由光缆芯、缆芯护套、导体和加强线材等部分组成。光缆芯的直径一般在  $5 \text{ mm}$  以下, 缆芯护套外径一般在  $10 \text{ mm}$  以下, 光缆芯的伸长率要求不小于  $0.5\%$ 。

光纤组合架空地线,已于1981年在加拿大魁北克水电站附近的735 kV超高压输电线路首先应用。中国研制的60 mm<sup>2</sup>6芯光纤组合架空地线的主要技术参数为:铝截面60 mm<sup>2</sup>,钢截面81.4 mm<sup>2</sup>,光缆6芯,拉断力94 kN,弹性系数128000 N/mm<sup>2</sup>,线胀系数14.0×10<sup>-6</sup>/℃,单位重量7.94 kN/km。

**镀锌钢绞线** 由镀锌钢丝绞制而成。其强度较高,而价格较低。架空地线平时不通过电流,所以一般的电力线路上通常采用镀锌钢绞线作为架空地线。

**技术发展趋势** 国际电工委员会(IEC)新的架空导线标准,包括铝绞线、铝合金绞线、钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线及铝合金芯铝绞线五大类。由硬铝线、A型B型铝合金线和5个品种的镀锌钢丝(有普通、高强、特强、1级镀锌、2级镀锌等)交叉组合构成19个架空线品种。例如A1/S1A代表普通1级镀锌的钢芯铝绞线,A2/S3A代表1级镀锌特高强钢芯B型铝合金绞线,A1/A3代表A型铝合金芯铝绞线等。系列截面采用R<sub>5</sub>、R<sub>10</sub>、R<sub>20</sub>优先数系混合制,具体的系列截面为10、16、25、40、63、100、125、160、200、250、315、400、450、500、560、630、710、800、900、1000、1120、1250 mm<sup>2</sup>等,与中国现行标准不一致,有很多品种在中国还是缺口,需待研究开发。



世界各国在500 kV及以上的超高压输电线路普遍采用了分裂导线,因此导线在线路建设投资中的比重显著增加。加拿大首先在735kV超高压线路上采用了4分裂42/7结构的钢芯铝绞线,钢铝比为5%。IEC新的架空线标准中,推荐采用45/7结构的导线,钢铝比为7%。钢铝比小的钢芯铝绞线,其交流电阻也小,是节能产品,选用在超高压输电线路,可减小导线比载,减轻杆塔荷载,能节约大量金属,是降低线路造价的有效措施。在高海拔及特高压输电线路,为了降低导线表面的场强,减小导线电晕损失和无线电干扰水平,需研究采用扩径导线。在超高压变电所中,可选用新型扩径软母线。电流大于4000 A的变电所宜选用耐热铝合金软母线。

为了适应大容量大跨越输电工程的需要,需研究开发弧垂特性(拉断力与每公里重力之比)大于18 km的大容量特强大跨越导线。

为了解决城市用电迅猛增长的需要,应加速耐热铝合金导线的应用。日本超耐热铝合金导线的长期使用温度达230℃,大大提高了线路的载流能力。

此外还需研究开发防冰雪导线、低损耗导线和低风压导线,推广采用自阻尼导线。农村电力网宜采用交流电阻较小的铝合金绞线或铝包钢线。

**参考书目** 机械工程手册 电机工程手册编辑委员会,电机工程手册,第26篇 第1章:架空导线,北京:机械工业出版社,1984

(刘士璋)

架空线力学计算 (mechanical calculations of overhead wire)

合理选择架空线的张力和弧垂,使其在各种气象条件下符合机械安全度的计算。架空输电线路采用的导线和架空地线是用杆塔支持,将其悬挂于空中的,以便使带电导线对地面或其他被跨越物之间保持足够的电气安全间距。要使架空线悬空,则必须施加张力。所施张力的不仅受架空线的机械强度控制,而且还取决于杆塔的强度、高度和档距。

**弧垂、线长与张力** 架空线弧垂、线长、张力的计算有两种方法,一种假定架空线的单位长度作用荷载沿线长均匀分布,导出的悬垂曲线形状是悬链线。用悬链线性质计算架空线的弧垂、线长和张力,称为悬链线法。另一种假定架空线的单位长度作用荷载近似沿悬挂点连线方向均匀分布,导出的悬垂曲线形状是抛物线。用抛物线性质计算架空线的弧垂、线长和张力,称为抛物线法。一般线档的架空线可用抛物线法计算,大跨越线档的架空线则应用悬链线法计算。

**弧垂** 自两悬挂点的连线沿荷载方向到架空线轴线间的距离。如图1所示,两种方法的弧垂f<sub>x</sub>的计算公式分别为

$$f_x = \frac{h}{l}x + \frac{H_0}{w} \left[ \operatorname{ch} \frac{wa}{H_0} - \operatorname{ch} \frac{w}{H_0}(x-a) \right], \quad \text{m(悬链线法)}$$
$$f_x = \frac{x(l-x)w}{2H_0 \cos \beta}, \quad \text{m(抛物线法)}$$

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。右侧图示为抛物线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>，以及弧垂f<sub>x</sub>。图中还标注了档距l、跨中位置x、以及导线重量w。

图1 架空线的几何形状及相应参数

图1展示了架空线的两种几何形状及其相关参数。左侧图示为悬链线形状，标注了悬挂点A和B，张力T<sub>A</sub>和T<sub>B</sub>，水平分量H<sub>0</sub>

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{l}{2} - \frac{H_0}{w} \operatorname{arsh} \frac{h}{\frac{2H_0}{w} \operatorname{sh} \frac{lw}{2H_0}}, \text{m(悬链线法)} \\ a &= \frac{l}{2} - \frac{H_0}{w} \sin \beta, \text{m(抛物线法)} \\ b &= \frac{l}{2} + \frac{H_0}{w} \operatorname{arsh} \frac{h}{\frac{2H_0}{w} \operatorname{sh} \frac{lw}{2H_0}}, \text{m(悬链线法)} \\ b &= \frac{l}{2} + \frac{H_0}{w} \sin \beta, \text{m(抛物线法)} \end{aligned} \right\} (2)$$

式中 sh、ch 为双曲正、余弦函数符号；arsh 为反双曲正弦函数符号； $l$  为相邻两悬挂点间垂直于荷载  $w$  方向的投影距离，称为档距，m； $h$  为相邻两悬挂点间沿荷载方向的高差，m，当右侧悬挂点高于左侧悬挂点时  $h$  为正值，反之为负值； $a$ 、 $b$  为架空线弧线最低点 C 分别到左、右悬挂点 A、B 间垂直于荷载方向上的投影距离，m； $w$  为架空线单位长度上的作用荷载，N/m； $H_0$  为架空线轴向张力在垂直于荷载方向上的分量，常称水平张力，沿线各点的  $H_0$  大小相同且为架空线弧线最低点 C 处的轴向张力，N； $\beta$  为两悬挂点间的高差角， $\beta = \arctg(h/l)$ 。

最大弧垂  $f_M$  是设计和架线施工中经常采用的主要数据，两种方法的计算公式分别为

$$\left. \begin{aligned} f_M &= \frac{h}{l} \left[ \frac{H_0}{w} \operatorname{arsh} \frac{h}{l} + a \right] \\ &\quad - \frac{H_0}{w} \left[ \operatorname{ch} \left( \operatorname{arsh} \frac{h}{l} \right) - \operatorname{ch} \frac{wa}{H_0} \right], \\ &\quad \text{m(悬链线法)} \\ f_M &= \frac{l^2 w}{8H_0 \cos \beta}, \text{m(抛物线法)} \end{aligned} \right\} (3)$$

线长 档内架空线悬挂时的弧线几何长度。两种方法的计算公式分别为

$$\left. \begin{aligned} L &= \sqrt{\left( 2 \frac{H_0}{w} \operatorname{sh} \frac{lw}{2H_0} \right)^2 + h^2}, \text{m(悬链线法)} \\ L &= \frac{l}{\cos \beta} + \frac{l^3 w^2 \cos \beta}{24H_0^2}, \text{m(抛物线法)} \end{aligned} \right\} (4)$$

张力 架空线上任一点 P 处的轴向张力  $T$  为该点至弧线最低点 C 间线长上的作用荷载与水平张力  $H_0$  的矢量和。在同一线档内，位于较高处的架空线轴向张力较大，两点间轴向张力之差等于该两点间的高差与单位长度上的作用荷载之积。高悬挂点处的轴向张力最大，而水平张力  $H_0$  则处处相同。如图 1 所示，高悬挂点 B 处的轴向张力  $T_B$  的两种方法计算公式分别为

$$\left. \begin{aligned} T_B &= H_0 + wh_{BC} = H_0 \operatorname{ch} \frac{wb}{H_0}, \text{N(悬链线法)} \\ T_B &= \frac{H_0}{\cos \beta} + \frac{w}{\cos \beta} \left( \frac{l^2 w}{8H_0 \cos \beta} + \frac{h}{2} \right), \text{N(抛物线法)} \end{aligned} \right\} (5)$$

式中  $h_{BC}$  为 B 点对弧线最低点 C 间的高差，m。

**架空线状态方程式** 两悬挂点间的架空线，某一已知状态下的水平张力与另一状态下的水平张力间的关系式。计算架空线的水平张力时，不仅考虑气象条件的变化，还须考虑档内原有线长、档距、高差等参数均有可能变化。另外，架空线并非完全弹性体，受拉后会产生塑性永久伸长（见架空线永久性伸长），特别在长期张拉作用下还会产生蠕变性的永久伸长。虽然状态变化包含的因素可能很多，但两种不同状态下档内弧线长度之差总是等于两种状态下架空线的弹性、塑蠕性、胀缩性变量之和。工程上常采用的状态方程式是将架空线近似为具有固定弹性系数的弹性体，且不考虑档距、高差和档内线长的塑蠕性永久变化，仅考虑气象条件不同时导致的水平张力变化，当高差角  $\beta$  较小时，还忽略  $\cos \beta$  的影响。直接用架空线弧线最低点的水平张力  $H_0$  来表示的抛物线法状态方程式为

$$H_2 - \frac{AEw_2^2 l^2}{24H_2^2} = H_1 - \frac{AEw_1^2 l^2}{24H_1^2} - \alpha AE(t_2 - t_1) \quad (6)$$

式中  $H_1$ 、 $H_2$  分别为已知和待求状态下架空线的水平张力，N； $w_1$ 、 $w_2$  分别为已知和待求状态下架空线单位长度上的作用荷载，N/m； $E$  为架空线的弹性系数，N/mm<sup>2</sup>； $\alpha$  为架空线的温度线胀系数，1/℃； $t_1$ 、 $t_2$  分别为已知和待求状态下架空线的温度，℃； $A$  为架空线的截面积，mm<sup>2</sup>。

**代表档距** 气象条件变化，悬垂式连续档的悬垂绝缘子串偏移，使各档架空线的水平张力趋于相等的对应等效档距。在高压架空输电线路中，一般每隔数千米才设置一基耐张型杆塔，架空线通过耐张绝缘子串固定到耐张型杆塔上。两基耐张型杆塔之间设置若干基直线型杆塔，借助悬垂绝缘子串将架空线悬吊于其上。通常称这种悬挂方式的耐张段为悬垂式连续档，如图 2 所示。两基耐张型杆塔之间的区段称为耐张段。其间各个档距、高差可能各不相同。但架设架空线时对带有悬垂固定型线夹的悬垂绝缘子串总是要求其处于铅垂位置，即同一耐张段内各连续档中的架空线均用同一的水平张力架线。

架线后气象条件变化时，若直线杆塔上悬垂线夹的位置强制不动，则耐张段内各不同档距中的架空线张力将以各自的参数按状态方程式的关系独立变化。这就可能使各档架空线出现不同的水平张力。若悬垂

线夹位置可动,则使悬垂线夹连同悬垂绝缘子串向水

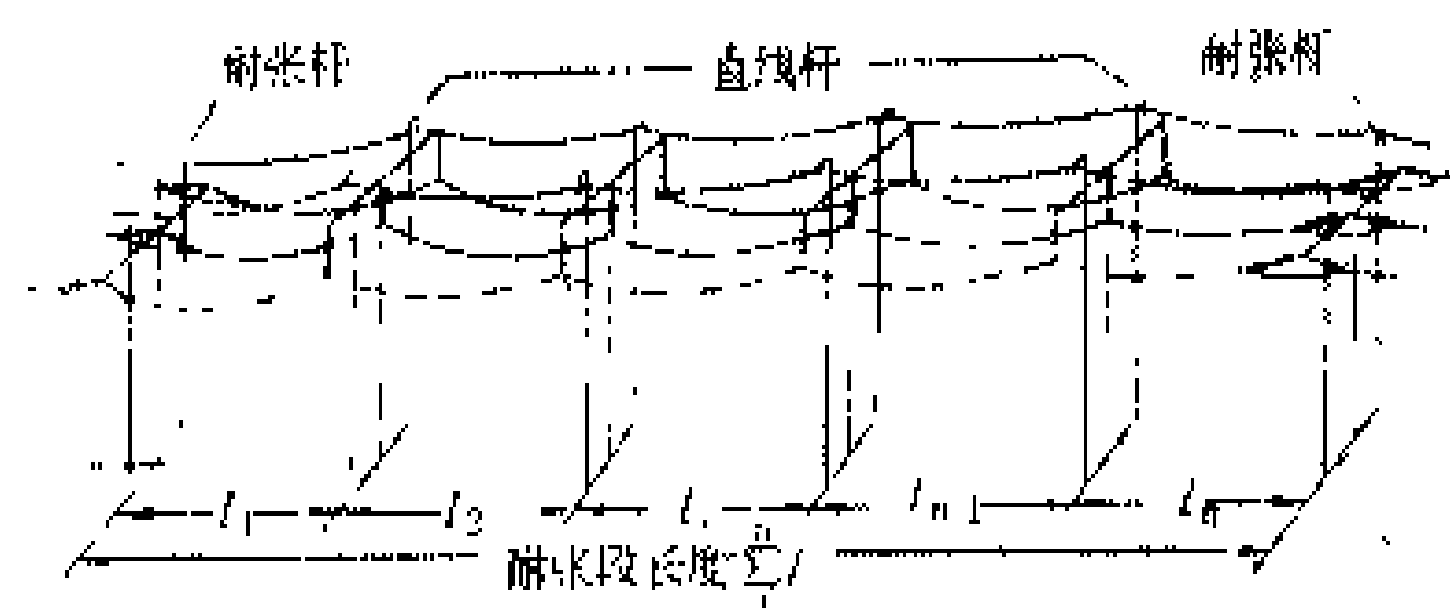


图2 悬垂式连续档的耐张段

平张力较大的档内偏移,随之使相邻档间的水平张力差减小。对于高压架空输电线路,悬垂绝缘子串较长而使张力差衰减更多。工程上认定悬垂绝缘子串可以自由移动而使各档水平张力趋于某一代表档距下的水平张力。以代表档距代入状态方程式中求解出各状态下的水平张力,作为连续档内各档的代表水平张力,该水平张力大体介于各档大、小水平张力之间。根据上述认定得出悬挂点等高连续档的代表档距 $l_{db}$ 计算公式为

$$l_{db} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n l_i^3}{\sum_{i=1}^n l_i}}, \text{ m} \quad (7)$$

式中 $1 \sim n$ 为耐张段内连续档的档距序号; $l_i$ 为第 $i$ 档的档距,m。悬挂点不等高的连续档则采用另外形式的代表档距计算公式。实际上,连续档内各线档在异于架线状态时的真实张力是不相同的,很难计算出一个非常恰当的代表档距去反映各档张力变化的综合量。因此,就出现各种不同的近似假定,从而得出计算连续档代表张力的不同方法。在国外除采用式(7)外,尚采用以下三种方法:

- (1) 以耐张段内各线档为孤立档的情况算得的各档张力,取其平均值作为该耐张段内的代表张力;
- (2) 以耐张段内的平均档距作为代表档距去计算该耐张段的代表张力;

- (3) 以耐张段的 $1/3$ 倍平均档距再加 $2/3$ 倍最大档距作为代表档距去计算该耐张段的代表张力。

**有效控制状态和有效临界档距** 当已知某一状态下的架空线水平张力时,可以利用状态方程式求得其它状态下的架空线水平张力。因此首先须确定各种档距下的已知状态,称之为有效控制状态。在架空线水平张力计算中,往往有数种不同的张力控制范围,如通常要求在最低气温或最大外荷载状态时,架空线的最大水平张力不应超过最大允许使用张力(如为架空线破断张力的40%);在平均运行气温状态下的水平张力不应超过架空线防振所限定的张力(如为架空线破断张力的25%);还可能根据线档的具体情况增加其它控制状态(如小孤立档内在架线状态下对最大过牵引

张力的控制)。从这些彼此无关的多个“控制状态”中,如果选取某一控制状态为已知状态,在某档距下,利用状态方程式求出的其余各控制状态下的架空线水平张力值均分别满足其余控制状态下的水平张力控制范围,则所选取的“已知状态”即为该档距下真正起控制作用的“有效控制状态”,也是真正的“已知状态”。其余的控制状态在该档距下对水平张力计算不起控制作用,则称为“无效控制状态”。

在不同的档距(或连续档的代表档距)区段各有不同的有效控制状态,则两相邻档距区段之间必有一档距同时受两种有效控制状态所控制,一般称这一档距为有效临界档距,它在架空线张力计算中是很有用的。以悬挂点等高的状态方程式(6)为例,将其归纳为如下形式

$$H_2 \left\{ H_2 + \left[ \left( \frac{AEw_1^2 l^2}{24H_1^2} - H_1 - AE\alpha t_1 \right) + AE\alpha t_2 \right] \right\} = \frac{AEw_2^2 l^2}{24} \quad (8)$$

$$\text{令 } F = \frac{AEw_1^2 l^2}{24H_1^2} - H_1 - AE\alpha t_1, \text{ N} \quad (9)$$

上式中的 $F$ 则为有效控制状态的判别系数。若有 $n$ 个张力控制状态,将各控制状态的参数 $w_1$ 、 $t_1$ 、 $H_1$ 代入式(8)中,可分别求出某档距 $l$ 和某一待求状态(参数为 $w_2$ 、 $t_2$ )下的 $n$ 个不同的张力 $H_2$ 。凡判别系数 $F$ 最大者,所求出的水平张力 $H_2$ 必定最小,则该最大 $F_M$ 系数值所对应的控制状态即为该档距 $l$ 下的有效控制状态。

在有效临界档距处,兼有前后相邻两个有效控制状态,即前后两个最大系数 $F_M$ 与 $F_M$ 在有效临界档距 $l_0$ 处相等,依此,有效临界档距的计算公式为

$$l_0 = \sqrt{\frac{24[(H_1 - H_2) + AE\alpha(t_1 - t_2)]}{AE \left[ \left( \frac{w_1}{H_1} \right)^2 - \left( \frac{w_2}{H_2} \right)^2 \right]}}, \text{ m} \quad (10)$$

式中 $H_1$ 、 $H_2$ 分别为两个有效控制状态下的架空线控制张力,N; $w_1$ 、 $w_2$ 为对应状态下的架空线单位长度上的作用荷载,N/m; $t_1$ 、 $t_2$ 为对应状态下的架空线温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

国外大多仅有架空线最大张力的两个控制状态,最多只有一个临界档距且是有效的,无须进行判别。

**架空线张力、弧垂特性曲线** 为全面掌握架空线在各种特定运行状态下各种档距(或连续档各种代表档距)的水平张力和弧垂,以便为杆塔和挂线部件的设计提供各种必要的张力、弧垂等数据而绘制的张力、弧垂曲线。在计算和绘图之前,先选定架空线各特定运行



状态下的气象组合及相应状态下架空线单位长度上的作用荷载,并根据前述原则选定各档距区段内的有效控制状态和有效临界档距。依据这些数据,采用状态方程式(6)计算各待求状态下各种档距的架空线水平张力,并根据求出的水平张力按等高档中最大弧垂公式(3)计算相应档距的最大和最小弧垂。将以上水平张力、弧垂数据以档距 $l_{ab}$ 为横坐标上的变量,以水平张力 $H_0$ (或水平应力 $\sigma_0$ )和弧垂 $f_{ab}$ 为纵坐标上的变量,即可绘出架空线的张力、弧垂特性曲线。

#### 参考书目

邵天晓, 架空输电线路的电线力学计算, 北京: 水利电力出版社, 1987

[日] 竹下英世著, 架空输电线路的弛度, 王伟兴译, 北京: 中国工业出版社, 1965

(邵天晓)

jiakongxian weifeng zhendong

#### 架空线微风振动 (aerolian vibration of overhead line)

架空线受到平稳的风横向吹过时产生的一种小振幅的振动。这种振动现象均发生在风速为 $0.5\sim 10\text{ m/s}$ 的微风情况下,故称为微风振动。微风振动的频率约为 $3\sim 120\text{ Hz}$ ,振幅很少超过导线直径。架空线经常发生超过允许幅值的微风振动,往往导致某些线路部件的疲劳损坏,如导线的疲劳断股,金具、间隔棒及杆塔构件的疲劳破坏或磨损等。其中导线疲劳断股是架空输电线路普遍发生的问题,严重时需要将全线路更换为新导线,甚至造成导线的断线事故。目前几乎所有的高压输电线路都受到微风振动的影响和威胁,因此,防止或减小架空线的微风振动一直是架空输电线路设计及运行中的一个重要课题。

**振动的机理** 造成微风振动的基本原因是风横向吹过架空线时,在其背风侧产生气流旋涡。虽然类似的现象早在15世纪就为人所知,但直到20世纪10年代美国太平洋煤气电气公司在加利福尼亚州的一条跨越海峡的线路上第一次发现导线振动断股的实例以后,才判明就是这种气流旋涡现象引起导线微风振动的后果。

导线背风面产生气流旋涡的现象属于流体力学问题,最早阐明旋涡理论的是科学家T. V. 卡门(Th. Von. Karman),故又称为卡门涡街。平稳的微风横向吹过导线时,空气的粘性使得贴近导线表面一薄层中的空气流速,沿着表面的垂直线连续降低到表面处的零值。这个流速过渡层称为边界层。边界层的厚度远远小于导线的半径。由于这种速度变化,边界层中的气流具有旋转性。边界层不稳定,易形成旋涡,随风流向下游。

圆柱体背风面产生上下对称发生的气流旋涡所形成的对称涡街是不稳定的,而在圆柱体背风侧上下方交替发生的旋涡所形成的不对称涡街则是稳定的,如图1所示。旋涡在圆柱体的上下方交替发生和交替脱离远去,造成圆柱体上下方的气流流线的不对称,结果便产生一个周期性的交变作用力施加给圆柱体(导线)。如果此交变力的频率与导线的固有频率相一致,导线便产生微风振动。

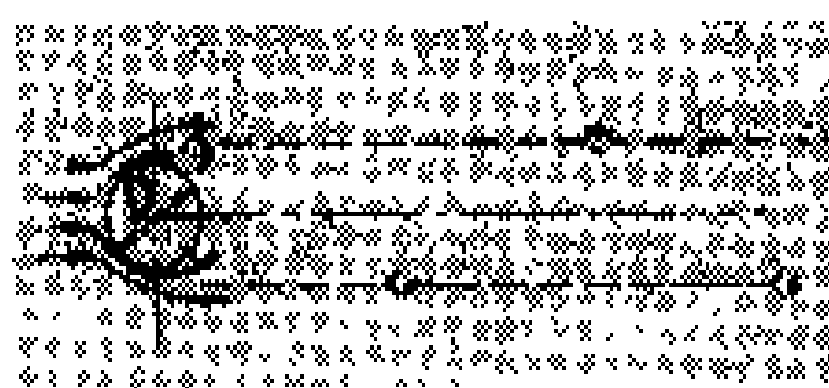


图1 卡门涡街

V. 斯特鲁哈尔(V. Strouhal)曾得到在流体中圆柱体的旋涡交替发生频率的经验公式为

$$f_s = S (v/D)$$

式中 $f_s$ 为斯特鲁哈尔频率, Hz;  $v$ 为流体的速度, m/s;  $D$ 为圆柱体的直径, mm;  $S$ 为斯特鲁哈尔数,其值与雷诺数有关。雷诺数 $Re = vD/E$  ( $E$ 为空气动力粘滞系数)。在输电线路的使用范围内,  $S = 185\sim 210$ , 中国在设计计算中取 $S = 200$  (适用于 $400 < Re < 40000$ )。

**锁定效应** 微风振动有一定程度的自激性。即使斯特鲁哈尔频率小于或大于导线的自振频率,导线振动时周围流线的分布情况,也将使相应的旋涡提前或延迟到导线振动速度为零的边缘位置时脱离导线,从而和导线的振动同步。这种现象称为锁定效应或同步效应。

气流作用于导线上的交变力是很小的,如直径为 $50\text{ mm}$ 的导线在风速为 $1\text{ m/s}$ 的横向风作用时,单位长度上受到的交变力峰值约为 $2.5 \times 10^{-2}\text{ N/m}$ ,而且交变力的作用方向沿着导线长度上是随机分布的,所以微风振动并不容易发生,必须有一个“起动触发”作用使导线开始振动。与此同时,锁定效应控制了旋涡脱离的周期规律,迫使其相位沿着导线长度方向有规律地排列起来,并与导线振动频率相同步。因此,锁定效应对助长振动和维持振动起着关键的作用。在实际的输电线路路上,经常观测到导线振动频率与按公式计算的斯特鲁哈尔频率不相符,或者是风速虽然改变了,而导线的振动频率并不改变,在比较长的档距内各处风速不尽相同,而导线仍可按同一个频率维持振动,这就是锁定效应所起的作用。若 $v_s$ 为斯特鲁哈尔公式确定的风速, $v$ 为实际风速,两者的比值 $r = v/v_s$ ,则维持导线振动的风速变化范围为 $0.87 \leq r \leq 1.37$ ,对于分裂导线中背风侧的子导线可达到 $0.8 \leq r \leq 1.5$ 。若风速的变化超出了这个临界范围,则稳定的振动将会结束。

**振动的数学描述** 架空输电线路是由导线、线夹、绝缘子和杆塔等部件所构成的一个复杂系统,必须随着所研究的特定问题作一些简化的假设。如果导线是

一根承受张力而不存在刚度及阻尼的柔索，则它的自由振动方程式为

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$$

由此得出横波的传播速度及导线的固有振动频率为

$$v_w = \sqrt{T/m}$$

$$f = (1/\lambda) v_w \approx (n/2l) \sqrt{T/m}$$

式中  $v_w$  为横波的传播速度，m/s； $m$  为导线单位长度的质量，kg/m； $T$  为导线水平张力，N； $\lambda$  为振动波长，m； $l$  为线路的档距，m； $n$  为档距内的振动半波数目。

在发生振动的初期阶段，振动以行波的形式出现。在稳定振动状态下，最常见到的是拍频波，这是由两个以上的振动频率重

叠在一起而形成的。在线档对称、风速均匀的理想情况下，导线则以驻波形式振动，此时的

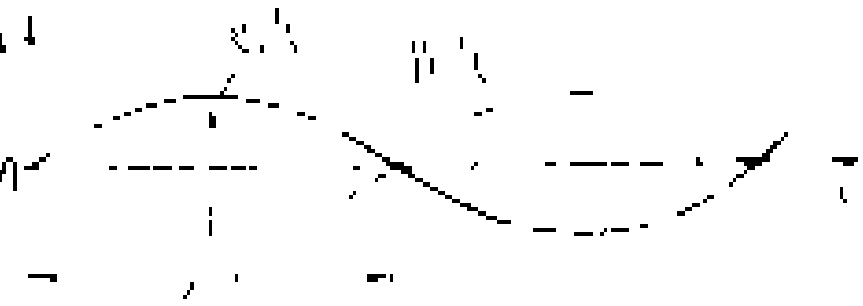


图2 振动的半波长与振幅

振动波形按正弦函数变化，且形成最大振幅值的波腹点及振动位移始终保持为零值的波节点，见图2。如果风不是沿线均匀地传递能量给导线，则波节点处将有一定的振幅以传递能量。导线上任意一点离开其平衡位置的位移值  $y$  的计算公式为

$$y = \frac{Y}{2} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin 2\pi ft$$

式中  $x$  为任意点距某一参考节点的距离，m； $Y$  为导线的双倍振幅，m； $t$  为时间，s。

**疲劳断股的部位及其成因** 输电线路的运行经验说明，凡是在导线上安装有金具零件的部位，如线夹、防振锤、间隔棒等处，都有可能发生疲劳断股，而在档距内自由振动的导线是不会发生疲劳断股的。绝大多数的疲劳断股发生在悬垂线夹的出口处，这里是导线与悬垂线夹即将脱离接触的部位，若在此处的导线横截面中心作垂直线，则断股数目基本上分布在垂直线的上下两端，并向垂直线左右两侧扩展。导线的内层和外层线股都将发生断股，有时内层断股数目可能多些。

振动强度和导线的耐振能力是研究导线疲劳断股的两个方面。振动强度主要以振幅、振动频率及振动持续时间等几项参数来描述，其中振幅决定了导线承受的动态弯曲应力，而频率与持续时间的乘积决定了振动次数。导线的耐振能力显然与线股材料的疲劳强度有关，但导线在悬垂线夹处受到张拉应力、弯曲应力及夹固应力等静态应力的作用，并且再叠加振动产生的动态应力，形成一种复杂的受力状态。在断股的发展过

程中，并发生磨蚀现象，它可视为腐蚀与磨损的联合作用，结果在线股表面形成极为微小的刻痕或伤痕，而铝材料的疲劳强度对于这类缺陷十分敏感，从而加速了疲劳断股的产生。导线是由多根线股按螺旋线方式分层扭绞制成的，相邻层的线股之间产生径向压力，且为点接触状态。当发生微风振动时，线股之间便产生相对位移而造成磨损和发热。线股的磨损和温度升高都使其疲劳强度降低。试验说明，悬垂线夹处导线的疲劳强度约降低到其原有值的50%。显然导线中间层的线股处于不利的情况之下。振动还迫使整个导线也作垂直上下运行，导线与线夹之间发生“敲击”现象，会使外层线股受到损伤。

**影响振动的因素** 影响架空线产生微风振动的因素很多，主要有地形及地物、风速及风向、档距长度、导线张力、悬垂线夹的性能及质量等。

(1) 地形及地物。风传输给导线的振动能量要与导线体系消耗的能量平衡，据此可以求得最大的振幅值。由于风传输给导线的能量受到地形（平地、丘陵及山区等）及地物（水面、草地、树木及建筑物等）的影响，实际的振幅值往往小于计算得出的最大振幅值。在实际工程中一般采用“地形系数”或“振幅系数”予以修正。例如：线路通过地形平坦又临近大型水面（河流或湖、海）的地区，地形系数取为0.8~1.0；而当线路通过有些树木的平坦地带，则地形系数取为0.15~0.2。另有一种方法采用“风的不规则系数”直接修正风的输入能量，然后再按能量平衡原则求得实际的振幅值。

(2) 风速及风向。风速的下限值决定于维持振动所需要的最小能量，一般取为0.5m/s。风速增大以后，与地面的摩擦阻力破坏了气流的层流性或均匀性，使之不能出现卡门气流旋涡。风速上限值随导线悬挂点离地面高度的增加而提高，通常达到8~10m/s。风向是振动持续稳定的必需条件，当风向与导线轴线之间的夹角在45°以上时，导线振动是稳定的，当此夹角在30°~45°时，振动的稳定性很小，而当此夹角小于20°时，一般不会发生振动。

(3) 档距长度。微风振动以一个档距为独立的振动单元。档距愈大，由于档距长度等于半波长的整数倍的振动频率值愈密集，故建立稳定振动的机率愈大，即振动持续时间增加。另一方面，风传输给导线的振动能量与档距长度成正比，这给大档距的防振设计带来很大困难。对于档距长度为100m以下的小档距，不仅出现振动的机率很小，同时档距端部的阻尼作用对振动有很大的影响，故小档距一般不需装设消振装置。

(4) 导线张力。为了说明导线张力对振动的影响，引入了导线平均运行应力（通常用EDS表示）的概念，

它是指年平均气温及无外荷载条件下的导线水平应力,习惯上将此时导线张力值用导线极限强度(通常用UTS表示)的百分数来表示。提高导线张力会使导线本身的阻尼作用减小,并且导线的允许疲劳强度也随张力的提高而降低。因而提高导线张力增加了振动的危险性。国际大电网会议(CIGRE)根据各国提供的线路运行经验进行总结,规定了一般情况下导线张力的上限值为25%UTS,这与中国根据线路的运行经验得到的结论相同。另一方面,限制提高导线的张力必然会增加线路的建设投资。若将规定的EDS上限值作为一个绝对标准,而不考虑导线构造设计的差别,也会导致严重的振动后果,是不经济的。因此,正确地估价导线张力的影响,应从导线的阻尼作用来分析,例如结构设计相同而采用高强度材料制造的导线,应取用较低的EDS值;如果改变导线的结构设计而提高了阻尼作用,则可能取用较高的EDS值。自阻尼导线就是一种特殊结构设计的导线,其EDS值可提高到35%UTS左右,从而明显地降低了线路的造价,并解决了大跨越线档严重的微风振动问题。

(5) 悬垂线夹。虽然悬垂线夹对振动强度并无影响,但振动现象却是通过悬垂线夹转变为动态应力作用于导线的。实际运行经验说明,由于悬垂线夹的型式、性能及质量等方面的差异,或者由于安装使用不当,都会造成疲劳断股情况的极大差别。20世纪50年代曾一度认为悬垂线夹是防止导线疲劳断股的关键,企图设计一种“防振线夹”。基于这种观点研制成功了预绞丝型悬垂线夹,可以达到比较满意的运行效果。现在对悬垂线夹的设计原则已充分考虑了微风振动的特点,使各种常规的悬垂线夹已具有满意的防振性能。(见架空输电线路金具)

**消振装置** 安装于导线上的一种专门装置,它可直接或间接地消耗导线振动的能量,从而降低导线振动的振幅及持续时间。1925年G. H. 斯托克布里奇(G. H. Stockbridge)发表了世界上第一篇有关微风振动方面的论文,提出了斯托克布里奇型防振锤的设计方案,现已成为世界上最广泛应用的一种消振装置。一般来说,消振装置的费用约占输电线路总造价的1%,广泛采用消振装置既能可靠地消除振动的危害,又使输电线路最大可能地降低建设投资及维修费用。目前广泛应用的消振装置主要有斯托克布里奇防振锤、扭式防振锤、撞击型防振锤、阻尼线、布雷特尔型防振器和护线条六种。

(1) 斯托克布里奇防振锤。简称防振锤,主要由钢绞线、重锤及线夹三个部件组成,其结构外形及力学模型如图3所示。防振锤的惯性质量及弹簧的弹性可使阻尼元件在导线振动时产生相对位移,因而产生粘性

阻尼作用而消耗导线振动能量。导线振动的振幅愈大,防振锤消耗的能量也愈大。防振锤安装在波腹点处效果最佳,如果安装在波节点处则效果为零。斯托克布里奇型防振锤具有两个谐振频率值,当其谐振频率与导线振动频率一致时,消耗能量达到最大值。为了改善防振锤的频率特性,出现了多种类型的改型防振锤,可具有3~5个谐振频率值,如意大利萨尔维公司生产的4R型防振锤具有四个谐振频率值。(见架空输电线路金具)

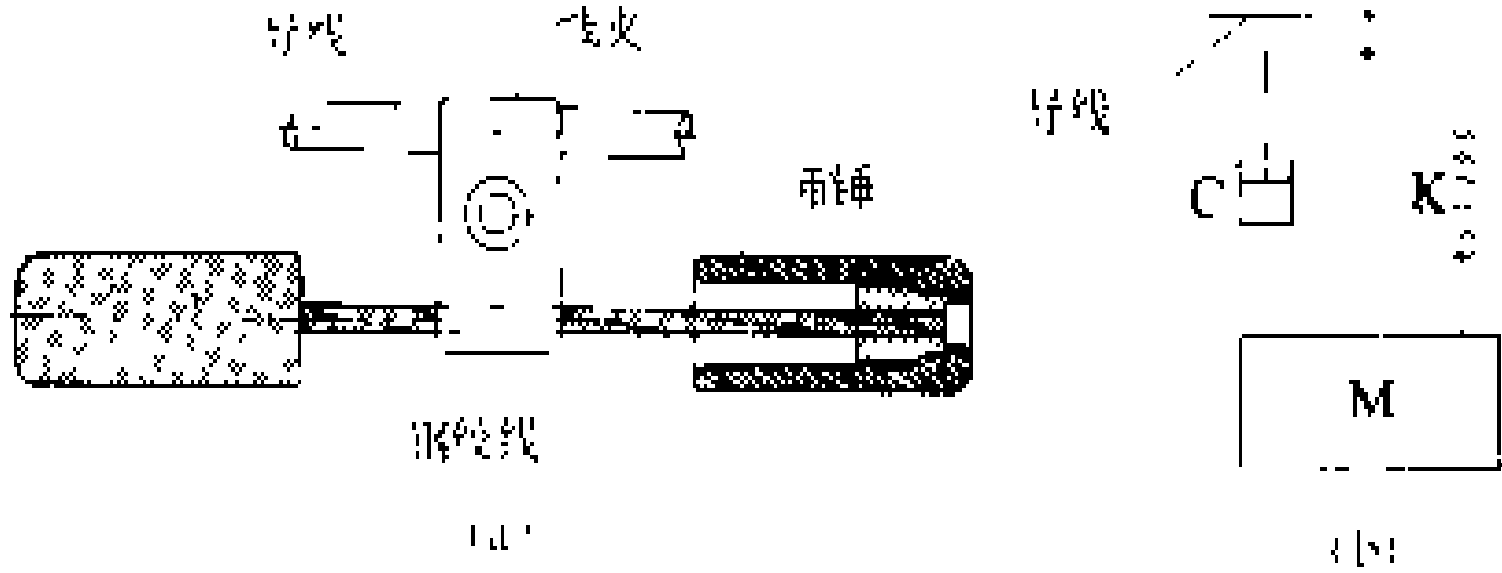


图3 斯托克布里奇型防振锤  
(a) 结构外形; (b) 力学模型

C—粘性阻力; K—弹簧常数; M—惯性质量

(2) 扭式防振锤。外形为哑铃状的铸铁锤头,其中部采用线夹固定于导线的侧面,使导线承受一个扭矩。它本身没有转动部分,当它跟随导线振动时对导线的扭矩发生变化,由此以导线往复扭转中的阻尼作用而消耗振动能量。扭式防振锤在加拿大和美国使用较多。

(3) 撞击型防振锤。由一些重块垂直地、无约束地叠在一起,然后用线夹悬挂于导线上,当导线振动时,各重块之间产生相互撞击作用而消耗振动能量。其优点是频率响应特性好,各种振动频率下均有效果。在北欧国家使用较多的爱格拉型防振锤就是其中的一种。

(4) 阻尼线。亦称贝特型防振器,它是取用相当长度的一段绞线(通常与导线规格相同)悬挂在悬垂线夹两侧的导线下面,然后每隔一定距离采用线夹与导线固定,形成一系列的花边状,还可以采取不同的尺寸构成多种多样的型式,如图4所示。导线振动时迫使阻尼线运动而消耗能量,其消耗能量的多少与阻尼线的总长度及花边数目等因素有关。

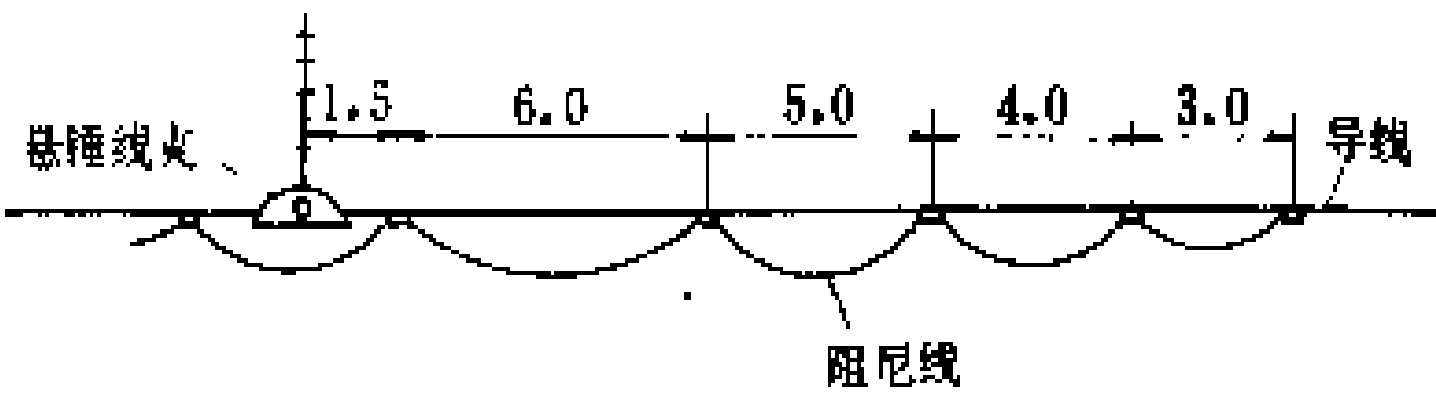


图4 阻尼线

(5) 布雷特尔型防振器。采用与导线规格相同的一段绞线跨接于悬垂线夹的两侧,并保持一定的弧垂值,形状如同非直线杆塔上的跳线,故亦称防振跳线。它也

可以说是仅有一个花边的阻尼线。在小截面导线上使用时，采用两段绞线构成双分裂跳线。布雷特尔防振器和图 4 所示的阻尼线尚有将振动能量由一档传至相邻线档中的作用。布雷特尔型防振器在法国应用较多。

(6) 护线条。采用十多根长度为 1.4~2.5m 的铝线股构成一组，紧紧地缠绕在悬挂点处导线外面，然后随同导线一起置于悬垂线夹中固定。现在普遍采用的是预绞丝护线条，它是用铝合金丝预制成的螺旋线，不需专用工具即可很方便地安装于导线上。护线条的作用是加强悬挂点处的导线刚度，改善悬垂线夹中的导线应力集中现象，由此达到减小导线受到的动弯应力及提高导线的耐振能力的目的。(见架空输电线路金具)

参考书目

郑玉琪等，架空输电线微风振动，北京：水利电力出版社，1987

(薄 通)

jiakongxian yongjiuxing shenchang

**架空线永久性伸长** (permanent elongation of overhead line) 架空线受拉伸长，拉力撤去后其长度不能复原而出现永久性变形的现象。架空线不是完全弹性体，初次受拉后不仅产生弹性伸长，而且还产生永久性伸长。永久性伸长包括四部分：①绞制过程中线股没有充分张紧，受拉后线股互相挤压，接触点局部变形而产生的挤压变形伸长；②在不同应力卸载时，分别形成的应力-应变特性曲线不平行引起的塑性伸长；③拉应力超过弹性极限进入塑性范围产生的塑性伸长；④受拉时间增长，金属内部晶体间的位错和滑移产生的蠕变伸长。输电线路工程界习惯称架空线永久性伸长为初伸长。

**架空线应力-应变特性** 架空线承受拉应力而伸长，其单位线长的伸长量称为应变。架空线应力  $\sigma$  与应变  $\epsilon$  的相互关系即为架空线的应力-应变特性。图 1 所示为钢芯铝绞线实际工作的应力-应变特性曲线。

曲线 oabcd 为钢芯铝绞线的初始应力-应变特性曲线。当钢芯铝绞线受拉的应力由零连续加大，其工作点沿初始特性曲线的 o、a、b、c、d 点逐渐上移；但当分别加载至 b、c、d 点而卸载时，则工作点分别沿 bb'、cc'、dd' 线下降。卸载后又重复加载时，工作点则分别改沿紧靠 bb'、cc'、dd' 的 b'b、c'c、d'd 线上移，与初始特性曲线相交后再改沿初始特性曲线前进。这种在不同应力卸载又重复加载的结果，使钢芯铝绞线获得一系列新的应力-应变特性曲线，而且其弹性系数逐渐增大，弹性极限逐渐提高。若钢芯铝绞线加载至应力  $\sigma_c$

并长时间维持不变，则工作点由 c 沿水平线 ch 右移至 h 点。在 h 点卸载又重复加载，工作点将沿 hh' 与 h'h 线移动。图中直线 ss' 为钢芯铝绞线受拉时钢芯部分的应力-应变特性曲线，由于铝股的塑性伸长大，钢芯铝绞线卸载至 b'、c'、d'、h'、k' 点时，其应力全部改由钢芯承担。

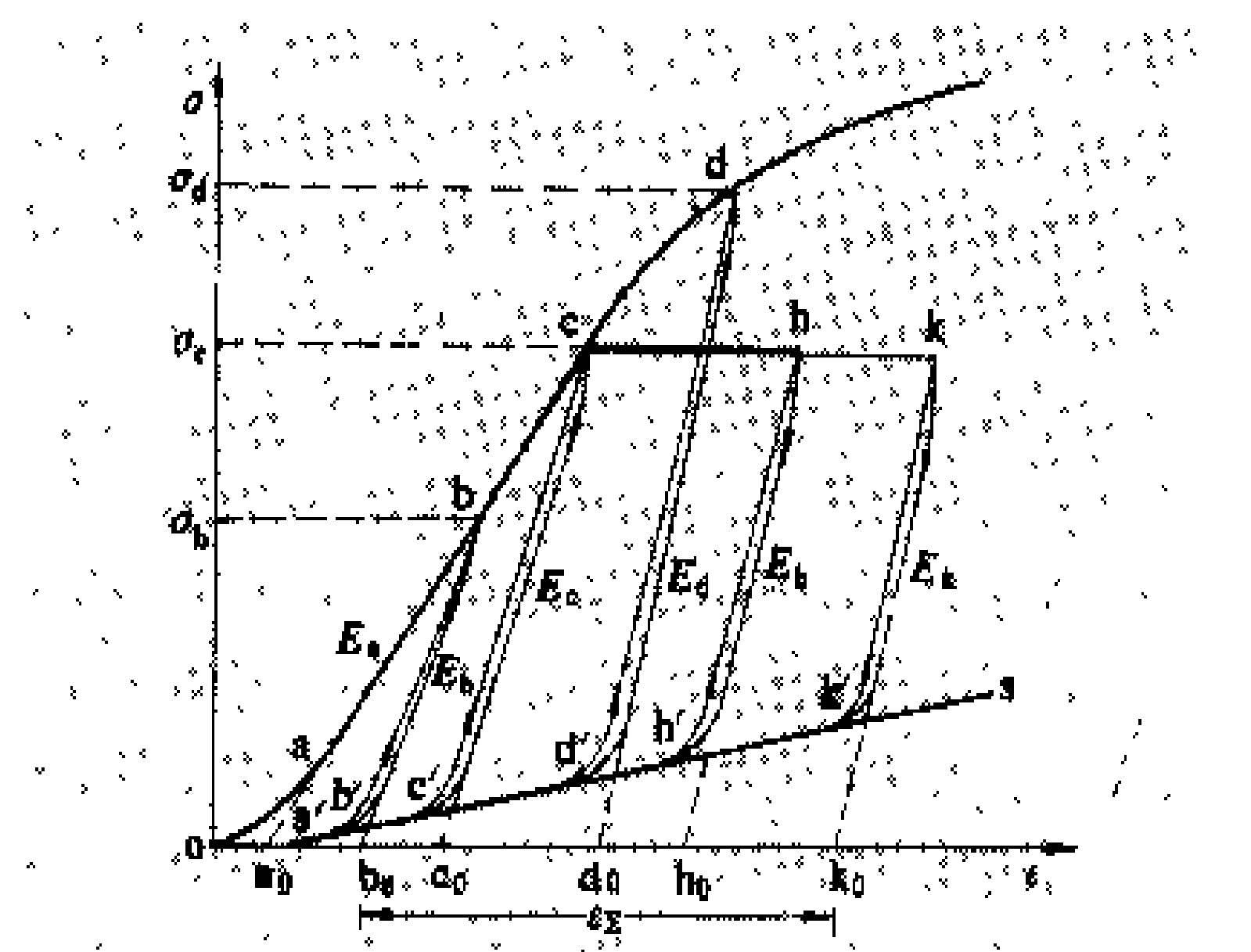


图 1 钢芯铝绞线实际工作特性曲线

在实际工程中，钢芯铝绞线由零应力张拉至架线应力  $\sigma_c$  时，工作点由 o 移至 b，这阶段便有单位挤压变形伸长  $\overline{oa_0}$  和单位塑性伸长  $\overline{a_0b_0}$  产生。运行中气象条件变化，若应力增大至  $\sigma_c$ ，工作点由 b 移至 c，这阶段又有单位塑性伸长  $\overline{b_0c_0}$  产生。宏观来说，线路运行气象条件是规律性往复变化的，因而运行中钢芯铝绞线的应力亦作阶段性的增大、减小而往复循环。若钢芯铝绞线的最大使用应力为  $\sigma_c$ ，则其运行应力将在  $\sigma_c$  及低于  $\sigma_c$  状况下往复变化。经历若干年若干次循环的积累，工作点将沿微倾的横线由 c 移至 k，这阶段钢芯铝绞线又有单位蠕变伸长  $\overline{c_0k_0}$  产生。运行时间越长，k 点越右移， $\overline{c_0k_0}$  越大，最终趋于稳定。单位挤压变形伸长  $\overline{oa_0}$  和单位塑性伸长  $\overline{a_0b_0}$ ，在紧线控制施工弧垂和线长时已将其排除在线档之外，唯有运行中产生的单位塑性伸长  $\overline{b_0c_0}$  和单位蠕变伸长  $\overline{c_0k_0}$  则残留在线档内不再消失。

**塑蠕伸长影响的处理** 根据图 1 所示的架空线实际工作特性曲线，设  $\overline{b_0c_0} + \overline{c_0k_0} \approx \overline{c_0k_0} = \epsilon_\Sigma$ 。由于总应变  $\epsilon_\Sigma$  的存在，便使运行中钢芯铝绞线的运行弧垂增大，影响其对地间距。因此在设计时须预先进行补偿，使架空线长期运行产生总应变后，自行增大弧垂而符合于预期要求，或在施工时预先进行处理，使架空线在安装过程中即达到稳定阶段，避免运行中再产生应变。各国采用的架空线预补偿与预处理方法有降低温度法、提高应力法和预张拉法等。

**降低温度法** 降低紧线时的计算温度，减小紧线安装弧垂以抵消长期运行后弧垂自行增大的方法。根据架空线实际工作特性曲线，联系初始阶段架线状态与最终稳定阶段运行状态建立的架空线实际状态方程

式为

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \frac{l_{ab}^2 g_b^2 E_k}{24 \sigma_b^2} \\ &= \sigma_k - \frac{l_{ab}^2 g_k^2 E_k}{24 \sigma_k^2} \\ &\quad - \alpha E_k [(t_b - \Delta t) - t_k] \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $l_{ab}$  为代表档距, m;  $\sigma_b$ 、 $\sigma_k$  为初始阶段架线状态 b 与最终稳定阶段运行状态 k 时的架空线应力, N/mm<sup>2</sup>;  $g_b$ 、 $g_k$  为状态 b 与状态 k 时架空线的比载, N/(mm<sup>2</sup>·m);  $E_b$ 、 $E_k$  为架空线初始弹性系数与最终弹性系数, N/mm<sup>2</sup>;  $t_b$ 、 $t_k$  为状态 b 与状态 k 时架空线的温度, °C;  $\alpha$  为架空线的温度线胀系数, 1/°C;  $\Delta t$  为等效降温量, °C, 其值为  $(\epsilon_s + \sigma_b/E_k - \sigma_b/E_b) / \alpha \approx \epsilon_s / \alpha$ 。与通常根据架空线最终特性曲线建立的最终状态方程式(见架空线力学计算)相比, 实际状态方程式的架线温度  $t_b$  须减去等效降温量  $\Delta t$ , 从而使施工弧垂略减小, 故称该法为降低温度法。张力架线法施工时, 因架空线须经长时间的张力临时锚定, 其间会有部分蠕变伸长产生, 而紧线时又被排除在线档之外, 故张力架线时的等效降温量  $\Delta t$  须作校正。在输电线路工程中, 架空线的总应变  $\epsilon_s$  值是根据蠕变试验得出的蠕变-时间曲线外推到 10 年时间的单位蠕变伸长量确定的。

**提高应力法** 提高紧线时的紧线应力, 减小紧线安装弧垂以抵消长期运行后弧垂自行增大的方法。根据架空线实际状态方程式与最终状态方程式的关系, 将架线温度的等效降低换算为架线应力的等效提高以进行补偿。计算架线应力提高率  $\eta$  的方程式为

$$\begin{aligned} \eta^3 + \left( \frac{l_{ab}^2 g_b^2 E_k}{24 \sigma_b^3} - \frac{\alpha E_k \Delta t}{\sigma_b^2} + 2 \right) \eta^2 \\ + \left( \frac{l_{ab}^2 g_b^2 E_k}{12 \sigma_b^3} - \frac{2 \alpha E_k \Delta t}{\sigma_b^2} + 1 \right) - \frac{\alpha E_k \Delta t}{\sigma_b^2} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\sigma_b$  为根据架空线最终状态方程式确定的架线应力, N/mm<sup>2</sup>;  $\eta$  为架线应力  $\sigma_b$  的提高率。式(2)说明, 对于架空输电线路, 架线应力提高率  $\eta$  是代表档距  $l_{ab}$ 、架线应力  $\sigma_b$  的函数, 随  $l_{ab}$ 、 $\sigma_b$  的不同而变化。

**预张拉法** 紧线前对架空线进行预超张拉, 以避免长期运行后弧垂自行增大的方法。架空线长期运行达到最终稳定阶段的条件, 可在初始阶段对架空线作大张力预拉, 使其在短时内迅速达到。如图 2 所示, 将架空线预张拉, 使其工作点沿初始应力-应变特性曲线 oac 上移至与最终应力-应变特性曲线 kk' 相交的 k 点, 从而获得单位塑性伸长  $\overline{a_0 k_0}$ , 以使在短时内产生长期运行后产生的永久性单位塑蠕伸长  $\epsilon_s$  而达到最终稳定阶段。亦可将架空线在应力  $\sigma_r$  下持续张拉  $T_r$  小时, 使工作点由 oac 上移至 x 点而后沿水平线 xy 右移至最终应力-应变特性曲线 kk' 上的 y 点, 从而获得单

位塑蠕伸长  $\overline{a_0 k_0}$ 。

通过预张拉达到最终稳定阶段后再进行安装的架空线, 即使长期在最大使用应力  $\sigma_r$  下运行, 亦不致再产生蠕变伸长, 从而消除了弧垂增大的影响。短时预拉

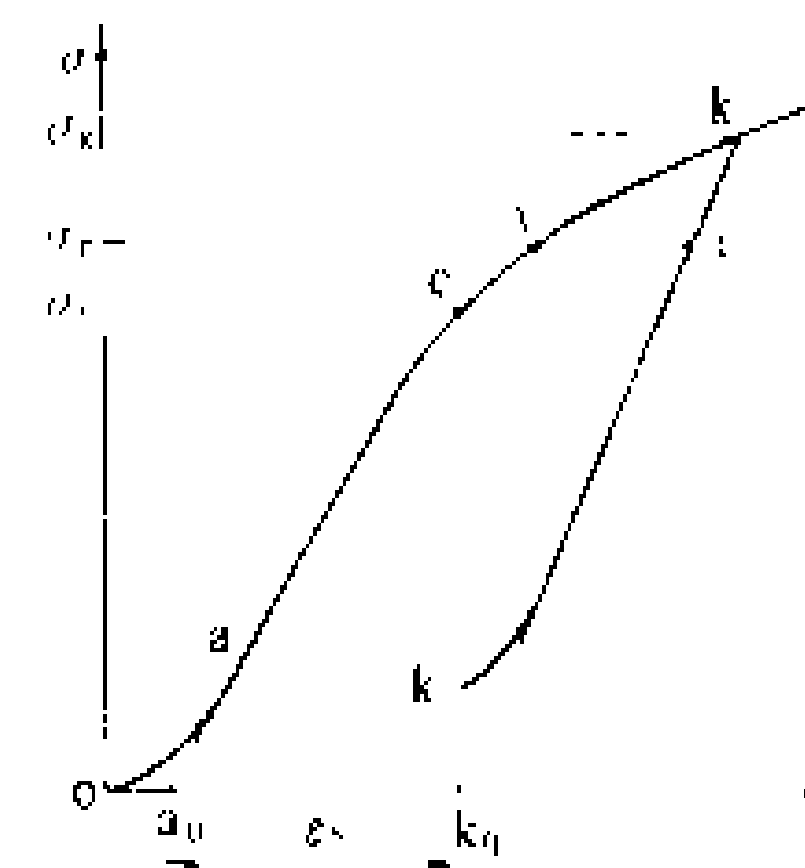


图 2 架空线预张拉特性

应力的取值不一致, 苏联对各种架空线均取短时预拉应力为架空线瞬时破断强度的 60%~70%, 中国尚无该项经验。

参考书目

东北电力设计院. 高压送电线路设计手册. 北京: 水利电力出版社, 1991

Глаунов А. А. Основы механической части изолированных линий электропередачи. Госэнергоиздат, 1956

(李博之)

jiakongxian zhuangtai fangchengshi

**架空线状态方程式** (tension equation of overhead wire) 见架空线力学计算。

jiaxian shigong

**架线施工** (installation of overhead conductors and ground wires) 将架空线用连接金具及绝缘子串架设在已组立的杆塔上的安装工序。架线施工是输电线路建设工程的完成阶段, 其具体施工方法按照架线全过程是否架空操作分为传统架线法及张力架线法两种。

**传统架线法** 利用人力或牵引机具牵引架空线, 使在档距间局部接触地面的情况下放出, 然后再按要求收紧的架线施工方法。一般包括放线、压接、紧线、观测弧垂和附件安装等工序。

**传统放线** 以牵引机具或人力将架空线沿线路方向牵引展放的工序。展放时, 架空线分别穿过杆塔上的放线滑车, 以便紧线工序顺利进行, 如图 1 所示。放线滑车应衬胶或尼龙, 其槽底轮径须按有关技术规定选用。放线前根据架空线线轴的大小, 沿线连续布置放线滑车, 以便顺序展放架空线。跨越铁道、公路、电力线等跨越物时, 则需搭设越线架, 使架空线由架构上方通过。

**压接** 将架空线的端头及严重损伤必须割断的端头,用相应的接续管进行连接的工序。耐张型杆塔处的架空线及跳线也需用相应的耐张线夹及跳线线夹连接。如果空线轻微损伤,可用补修管补修。连接及补修的主要方法都是压接。压接方法有钳压法、液压法和爆压法三种。架空线连接后,承受张力者其握着力不应低于架空线计算拉断力的95%,导电部分的电阻不应高于同等长度架空线的计算电阻值。

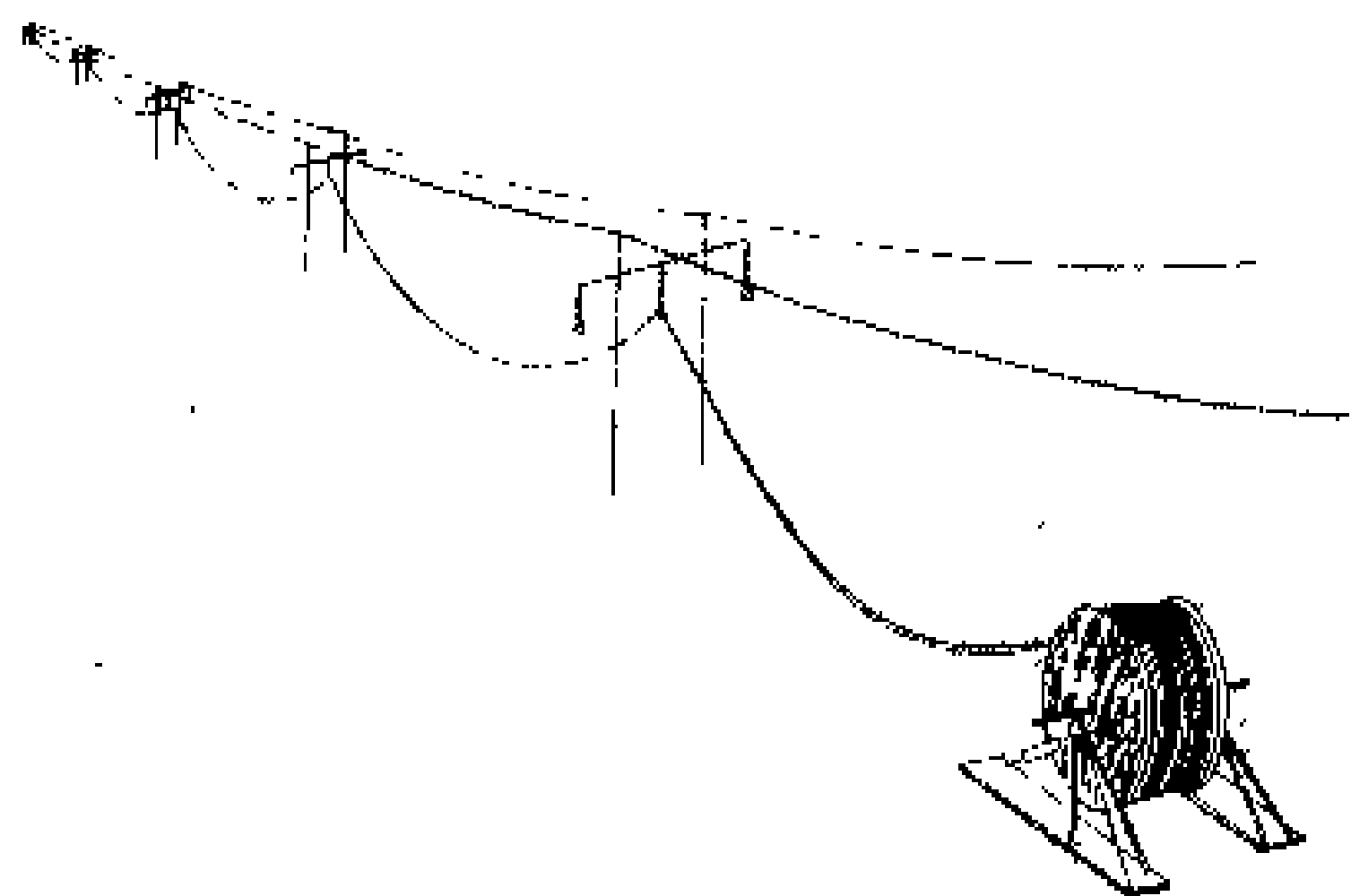


图1 传统放线示意

(1) 钳压法。适用于较小规格的导线连接,包括标称截面 $185\text{ mm}^2$ 及以下的铝绞线和标称截面 $240\text{ mm}^2$ 及以下的钢芯铝绞线,但不宜用于LGJ-240/55型钢芯铝绞线。压接时将导线搭接套在椭圆形接续管内,每间隔一定距离,用配以相应钢模的钳压器在椭圆管两狭边交替加压形成一定深度的陷窝,使管体与导线共同压缩变形,从而产生摩擦力,以阻止导线承受张拉后滑移。

(2) 液压法。适用于钢绞线及各种大规格钢芯铝绞线的连接。压接时将架空线端头插入压接管内,用配以相应钢模的液压机对压接管均匀施加压力,使管体与架空线压缩而连为一体。压接管为圆形,钢模内腔为六角形。钢模的压长根据压接管的硬度和液压机的出力选择,压长决定后,便可确定压接管的最少施压次数。

(3) 爆压法。利用炸药爆炸产生的巨大能量取代机械压力将架空线与其相应的压接管压成一个整体。具体方法是在压接管外面紧密缠绕适量的导爆索或大乳炸药,利用雷管引爆以达到一定的压缩尺寸,又称外爆压接法。此外还有内爆压接法,是在压接管内装极少量无烟药,引燃后产生大量气体推动活塞将导线连同钢爪和铝爪向管口运动,借助铝管渐缩的锥形内腔使铝爪楔在铝管与导线之间,钢爪夹在钢芯与铝爪之间,互相压紧以产生需要的摩擦力阻止导线滑移。内爆压接法具有震动小、噪声小、操作简单的特点,适宜于特殊条件下应用。

**紧线** 在耐张型杆塔处以牵引机具按要求收紧架空线,安装耐张线夹和耐张绝缘子串,完成导线的升空

就位工序。一般情况下,两个耐张型杆塔间包括若干个直线型杆塔,形成互相连通的若干线档,称为一个耐张段。紧线时在耐张段一端的挂线耐张型杆塔上松弛挂线,即将连接绝缘子串、耐张线夹的架空线挂在横担上,作为锚端受拉张紧。在另一端紧线耐张型杆塔外侧,利用牵引机械使架空线在该耐张段内收紧升空。在指定的线档内观测弧垂,调整牵引张力,使弧垂达到规定数值,并在紧线耐张杆塔的架空线上对准挂线孔进行画印。松退架空线,使画印点落至地面,按耐张线夹的安装位置割线安装耐张线夹。然后令连接好的耐张线夹和耐张绝缘子串升空,再次收紧架空线,将绝缘子串挂向紧线的耐张型杆塔上。

**观测弧垂** 架空线的张力是通过架空线弧垂控制的。弧垂常指线档间架空线的最大垂度,对于一般的等高线档即档距中点的垂度。紧线时,依据设计部门提供的弧垂曲线或数据表,确定架空线的安装弧垂。观测弧垂的基本方法是在观测弧垂的线档两端杆塔悬挂点的垂直下方一定距离绑扎水平弧垂板,从一侧弧垂板用仪器或望远镜目测对面弧垂板,视线切割架空线边缘时,即达到规定的弧垂。具体方法有等长法、异长法、角度法和平视法四种。

(1) 等长法。两端悬挂点与弧垂板的垂直距离均等于要求的弧垂。该法适用范围很大,当两悬挂点地上高度大于弧垂值且视线无阻时均可使用。

(2) 异长法。两悬挂点与弧垂板的垂直距离不相等,设一端垂直距离为 $a$ 值,根据观测时要求的弧垂值 $f$ ,按下式求算另一端的垂直距离 $b$ 值,即

$$b = (2\sqrt{f} - \sqrt{a})^2$$

当视线与导线的切点偏离档距中点不超过 $1/4$ 档距时,可使用异长法。切点偏离档距中点过大时用异长法观测弧垂容易引起较大的误差。

(3) 角度法。以异长法的计算公式为基础,可求出视线的角度值,按此角度利用经纬仪观测弧垂。其适用范围也与异长法的相同。

将经纬仪设在悬挂点下方时,视线的仰俯角为

$$\theta = \arctg \left( \frac{\pm h - 4f + 4\sqrt{af}}{l} \right)$$

式中 $l$ 为观测档的档距,m; $h$ 为观测档两悬挂点间的高差,观测站悬挂点较低时其前取+,反之取-,m; $f$ 为观测时要求的弧垂,m; $a$ 为经纬仪仪器与悬挂点间的高差,m。

(4) 平视法。两侧杆塔上的弧垂板要求处于水平位置,用水准仪平视切架空线最低点的方法观测弧垂。平视法应求出观测档的大小平视弧垂,其值按下式计算,即

$$f_1 = f \left( 1 + \frac{h}{4f} \right)^2$$
$$f_2 = f \left( 1 - \frac{h}{4f} \right)^2$$

式中  $f_1$  为大平视弧垂, m;  $f_2$  为小平视弧垂, m。根据  $f_1$  或  $f_2$  选择仪器支点。对大档距不适于使用角度法且满足  $h < 4f$  时, 可使用平视法观测弧垂。

**附件安装** 紧线完毕并在紧线耐张型杆塔上挂线后, 在直线型杆塔上安装架空线的悬垂线夹以及悬垂绝缘子串的均压屏蔽环或招弧角, 在架空线上安装防振锤和间隔棒, 在耐张型杆塔上安装耐张绝缘子串的均压屏蔽环或招弧角, 在两侧耐张线夹之间安装跳线和跳线绝缘子串。

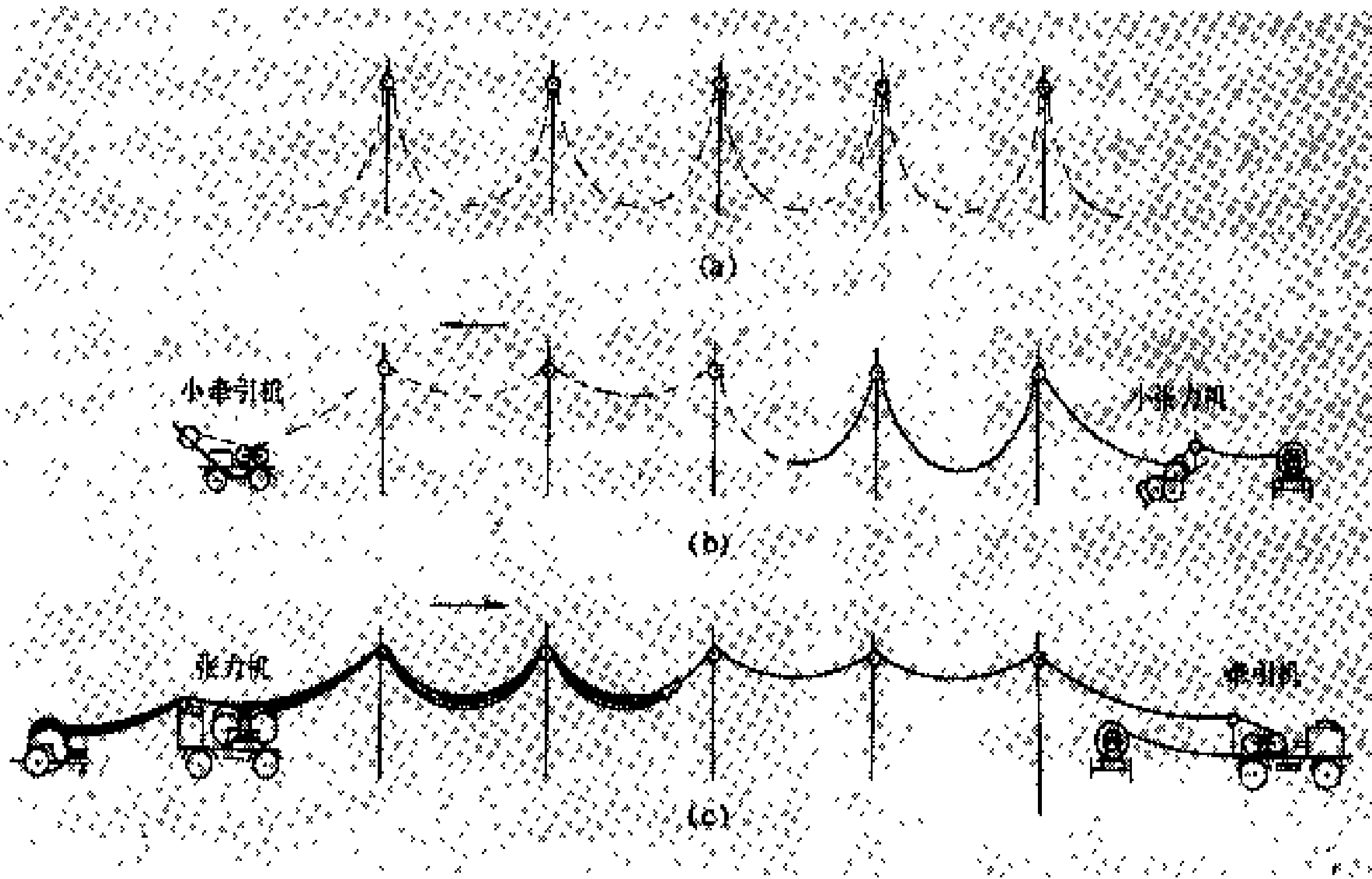


图2 张力放线示意  
(a) 人工展放导引绳; (b) 导引绳领放牵引绳; (c) 牵引绳领放导线

(1)安装悬垂线夹。在横担上悬挂双钩紧线器或链式紧线器, 其下连提线器将导线提起, 卸去放线滑车, 在导线上缠绕铝包带或护线条, 安装悬垂线夹并与绝缘子串下端的挂板连接好; 放松链式紧线器, 拆卸工具。悬垂线夹应安装在横担挂孔下方铅垂位置, 对子连续倾斜的线档, 悬垂线夹的安装点应按计算要求予以必要的移位。

(2)安装防振锤和间隔棒。防振锤可随线夹同时安装, 其中心线与线夹出口之间的距离应符合设计要求, 如无特殊要求, 其结构面应保持铅垂向下。线档内分裂导线的间隔棒可乘坐飞车安装, 其位置应符合规定的次档距长度要求。

(3)安装跳线。安装两耐张线夹之间导线的跳线时, 必须使跳线与杆塔构件 (包括脚钉、拉线以及与横担相连的第一片绝缘子的钢帽) 的间隙不小于设计的限值。安装前, 应取得跳线线长、跳线弧垂等数据, 安装时作好比量调整, 安装后进行整形和复查。

跳线连接板必须严密结合, 铝制连接板应先用汽油清洗, 再用钢丝刷清除涂有导电脂的接触面氧化铝薄膜。

**张力架线法** 在架线全过程中, 导线脱离地面处于架空状态的架线施工方法。利用牵引机和张力机展放导线, 使导线保持适当张力由杆塔上的放线滑车中通过, 要求不接触地面。放线后可在牵引机场和张力的临时锚线、紧线、平衡挂线。张力架线可以防止地物磨损导线, 避免在运行中因导线表面不光洁而产生电晕现象, 以减轻电力线路对附近无线电系统的干扰。张力架线施工效率较高, 便于跨越江河和高山, 并能减少施工过程对农作物的损坏, 是今后架线施工的发展方向。张力架线法的主要工序有张力放线、压接、紧线、观测弧垂、平衡挂线等。

除压接、观测弧垂的作业方法和要求与传统架线法相同外, 其余均有所不同。

**张力放线** 采取过渡牵引法展放导线, 一般分为人工展放导引绳, 以导引绳领放牵引绳, 以牵引绳领放导线, 临时锚定导线等步骤, 如图2所示。

一般每相导线 (含有若干根子导线) 由一根牵引绳领放, 其连接方式如图3所示。牵引板可导向, 以便顺利通过滑车, 使牵引绳及子导线各走其相应的滑轮; 平衡锤可防止牵引板翻转, 旋转连接器可释放导线随张力变化而产生的扭力。

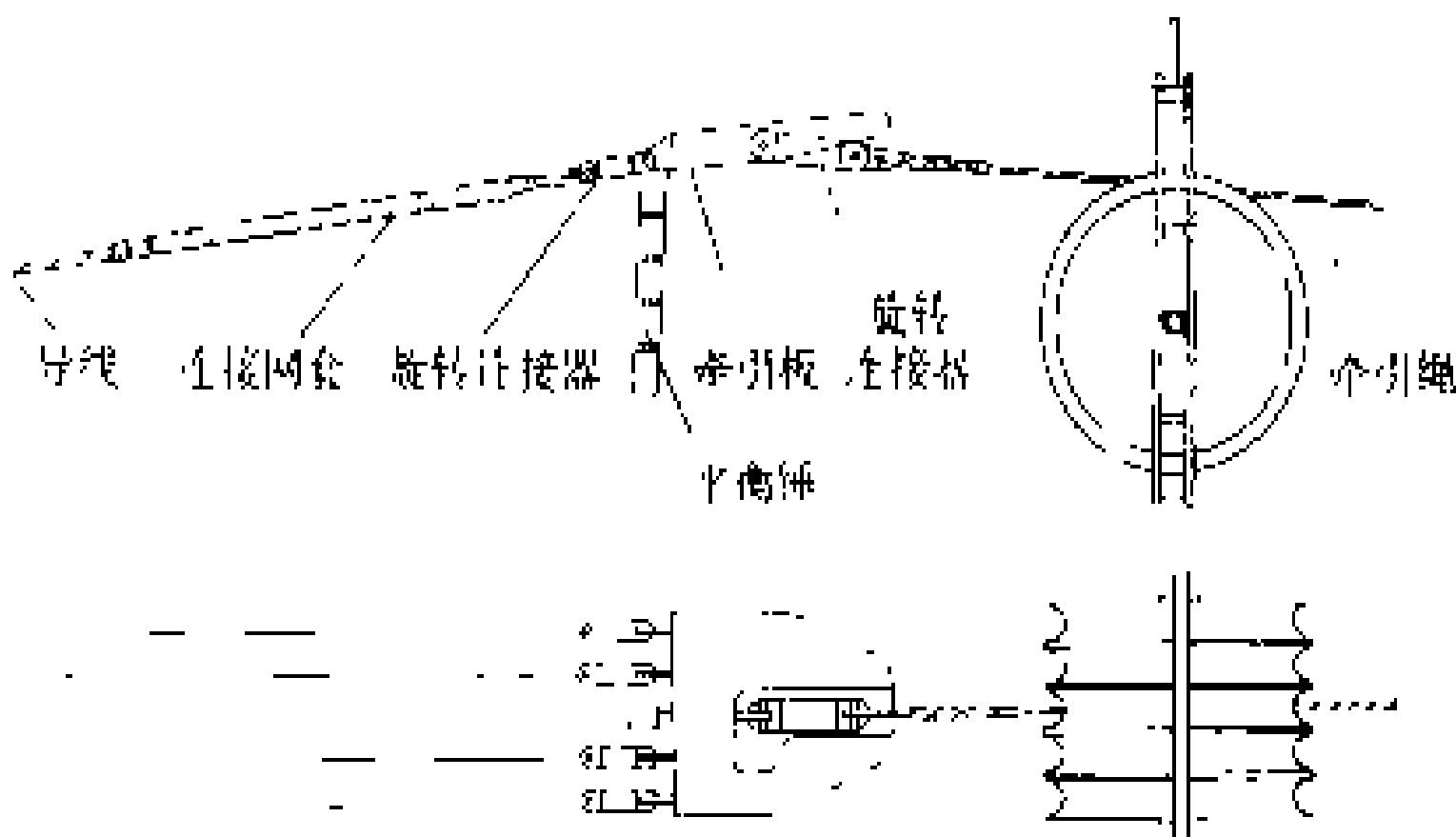
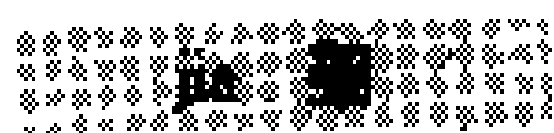


图3 牵引绳与4根子导线的连接

(1)放线机械。主要机械为牵引机和张力机 (见架线施工机具)。牵引机是放线的动力, 张力机在放线过程中对架空线施加张力。牵引机控制放线速度, 张力机控制放线张力, 且能平稳调整与牵引机同步运转。在放线作业时, 牵引机和张力机分别设置在放线区段的两



端,它们需在远距离情况下配合工作,司机应配带对讲机和监听器,以策安全。

(2)放线滑车。张力放线的放线滑车,其构造应符合一定的技术标准,滑轮轮径对于导线直径的倍数须满足有关技术规定的要求。轮径过小除会使表面铝股伸长引起导线松股外,还会加重内层铝股被钢芯压伤。滑轮直径相同的情况下,导线通过滑车达15次以上时,松股和压伤情况显著增加。因此,导线通过滑车的次数一般不宜超过15次,放线张力偏高时还应适当减少其通过次数。

(3)放线作业。由于机械牵引展放,放线区段不受耐张段及耐张型杆塔的限制。一个放线区段除包括多基直线型杆塔外,还可包括多基耐张型杆塔。一般情况下放线区段不超过8 km。导线线轴集中在张力机场处,一轴放完时,接续另一轴,直至全区段放完。然后将导线在两端机场处临时锚固于地(简称临锚),并用链式紧线器调节锚线张力,使导线与障碍物保持安全距离。

放线时应选择适当的张力,使导线能脱离地面并保持一定的距离,个别不易脱离地面的线档,则在触地点设置滚轮或橡胶垫。一般放线张力不宜偏高,以免增大作业难度和导致导线内层铝股被钢芯压伤而使导线机械强度下降。

压接 张力架线时架空线的连接作业方法和要求与传统架线的压接方法相同,但实施方式却分为集中压接与分散压接两种。

(1)集中压接。架空线的压接工作集中在张力机场进行。由于这种压接方式的接续管势必通过多基杆塔的放线滑车,为防止接续管通过滑车时发生弯曲,在管外须安装保护钢甲,并在管两端以橡胶套保护导线。一般情况下,集中压接方式仅用于较短的放线区段,以确保接续管通过滑车的次数不致超过一定限度。

(2)分散压接。适用于地形比较平缓地段导线的压接。放线时,在张力机场先用连接网套将导线临时连接。导线放到牵引场后,将导线临时连接压至地面,拆除后正式压接导线接续管。这种压接方式,接续管可不通过滑车。

在山区施工,如分散压接有困难,还可采用混合方式,使接续管通过滑车的次数不超过限定次数。

紧线 张力架线的放线区段不受耐张段的限制,紧线区段也可不受放线区段的限制。紧线动力一般不设在耐张型杆塔处,而设在直线型杆塔间的张力机场或牵引机场。因此紧线操作一般在直线型杆塔处进行,作业方法仍与传统架线法相同。放线区段与紧线区段

的相互关系如图4所示。

平衡挂线 紧线后,在耐张型杆塔上采用平衡挂线法挂线,即在挂线过程中,耐张型杆塔两侧同时承受导线张力,使杆塔不须设置临时补强拉线来保持平衡状态。具体步骤分对称锚线和平衡挂线两步进行。

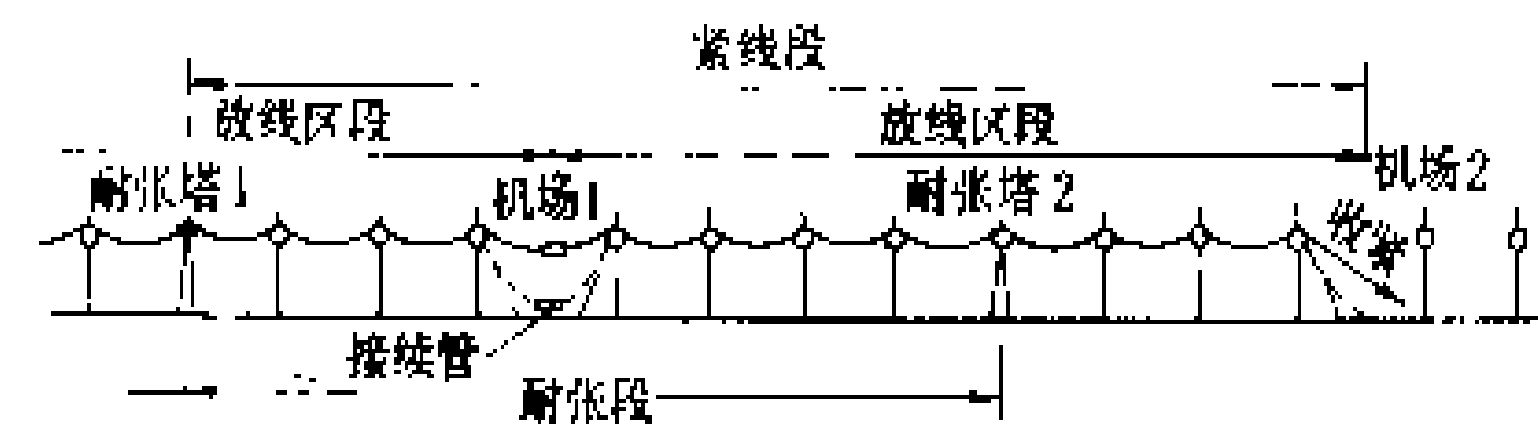


图4 紧线段示意

(1)对称锚线。在耐张型杆塔两侧的画印点以外,不影响安装耐张线夹的适当距离导线上装设连有临锚钢绳的卡线器,利用链式紧线器收紧临锚钢绳使两侧导线临时锚定在横担上,而使两卡线器之间的一段导线松弛。耐张型杆塔两侧临锚钢绳的张力须保持大致平衡。

(2)平衡挂线。在导线两画印点之间切断,使之下垂至地面(或两侧的高空工作台上)进行量尺,安装耐张线夹与耐张绝缘子串,再牵引挂线。操作过程示意如图5所示。

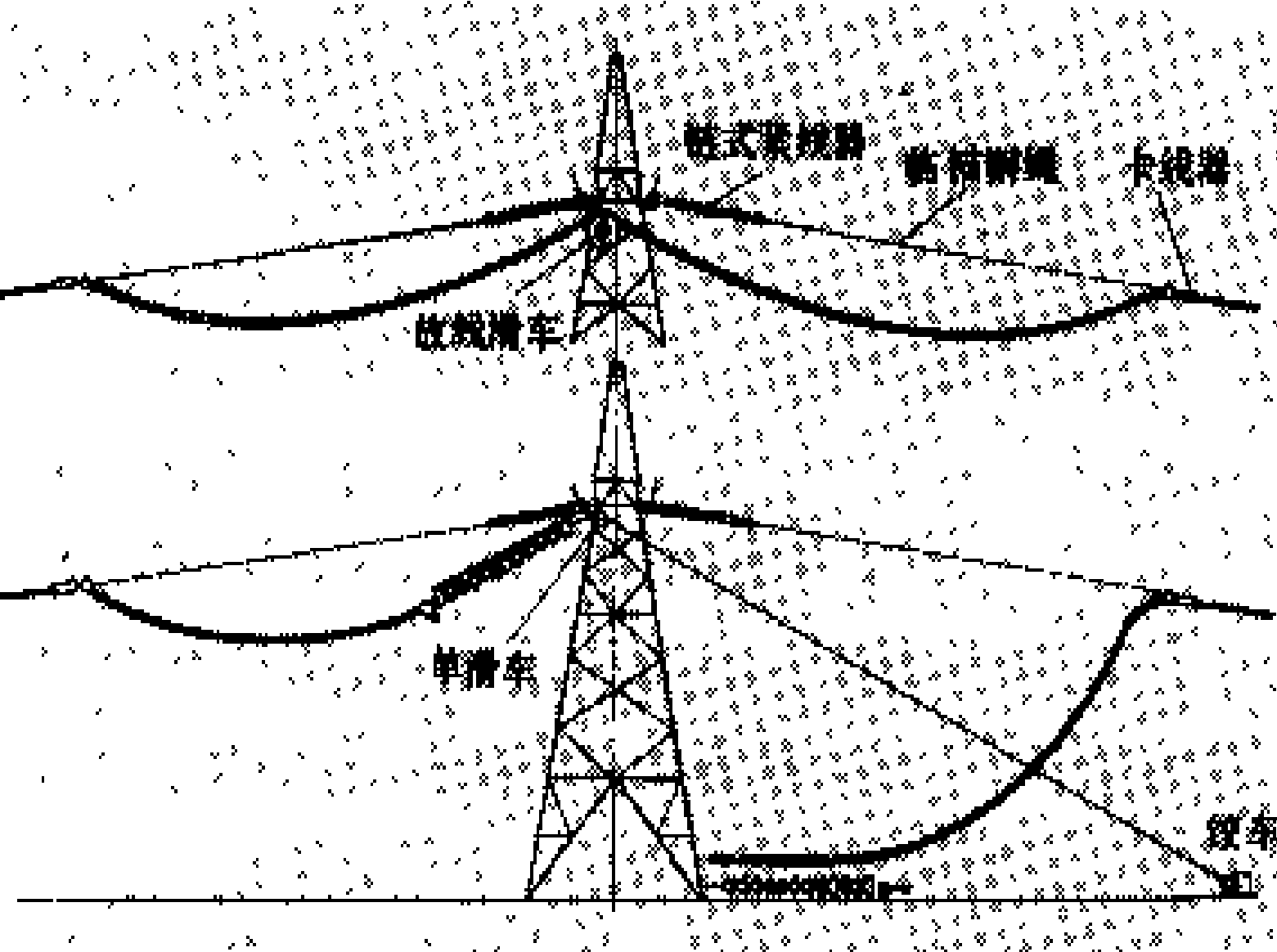


图5 平衡挂线示意

防护措施 由于导线的木质线轴和衬胶滑车的绝缘作用以及牵引机和张力机械轮胎、垫木的隔离作用,在张力架线施工过程中导线常处于对地绝缘或仅一点接地的状态。因此,架线过程中应特别注意预防各种电气侵害,包括来自大气感应的静电和雷电,来自邻近电力线路的交流静电感应电压和磁感应电动势以及与被跨越电力线路的误接触等。防护措施包括将牵引机、张力机的机体接地,放线时在牵引绳和导线上安装接地滑车,架空操作时按程序短接绝缘子串、设置工作接地。当放线区段中跨越电力线路施工时,还应在牵引机、张力机场铺设必要的等电位接地网和设备区围栏,以防止跨步电压和接触电压的形成。



参见彩图插页第5页17图。

(谢景元)

jiaxian shigong jiju

# 架线施工机具 (tools and machines for installation of overhead conductors)

分为放线机具、紧线机具和附件安装机具三大类。传统放线机具重要的有专用牵引机具、导线压接机和放线滑车；张力放线机具除导线压接机、放线滑车及其他小型专用工具外，重要的还有牵引机、张力机等。紧线机具除卡线器等小型专用工具外，重要的还有轻型机动绞磨（见杆塔组立施工机具）等。附件安装机具除双钩紧线器、提线器等小型专用工具外，还有飞车等。

**牵引机** 通过牵引钢丝绳牵引导线的机械。根据传动方式的不同，可分为液压传动、液力传动和机械传动三种形式。图1是液压传动牵引机的结构示意图，它由原动机、液压泵、液压控制回路、液压电动机、控制器、主减速器、末级减速器和双摩擦牵引卷筒等组成。工作原理是：原动机驱动液压泵输出压力油供给液压电动机，经主减速器及末级减速器减速后带动双摩擦卷筒卷绕钢丝绳进行牵引作业。牵引力与液压电动机进口处的液压油压力成正比，牵引速度与输入液压电动机的液压油流量成正比，故该牵引机通过液压油流量的调节无级地控制牵引力和牵引速度的大小。

**液力传动牵引机**由液力传动箱代替上述包括液压泵、液压电动机在内的液压系统，其余部分结构基本相同。液力传动箱又由液力变矩器和能自动换挡的多档变速箱组成。液力变矩器对负载有自动适应的性能，当牵引阻力增加时能自动降低转速、增大输出扭矩，反之能自动增大转速、减小输出扭矩。液力变矩器与多档变速箱联合使用，便使牵引力和牵引速度有很大的调节范围。

**机械传动牵引机**则由摩擦离合器和多档齿轮变速箱代替上述液力传动箱。由于机械传动牵引机的变速和变向是依靠齿轮变速箱换挡操作来实现的，故这种牵引机只能有级变速，且变速时还必须先制动牵引卷筒，然后松开摩擦离合器，才能进行换挡操作。机械传动牵引机的技术性能不及液压和液力传动的牵引机，但其结构简单，造价较低，适用于一般小型

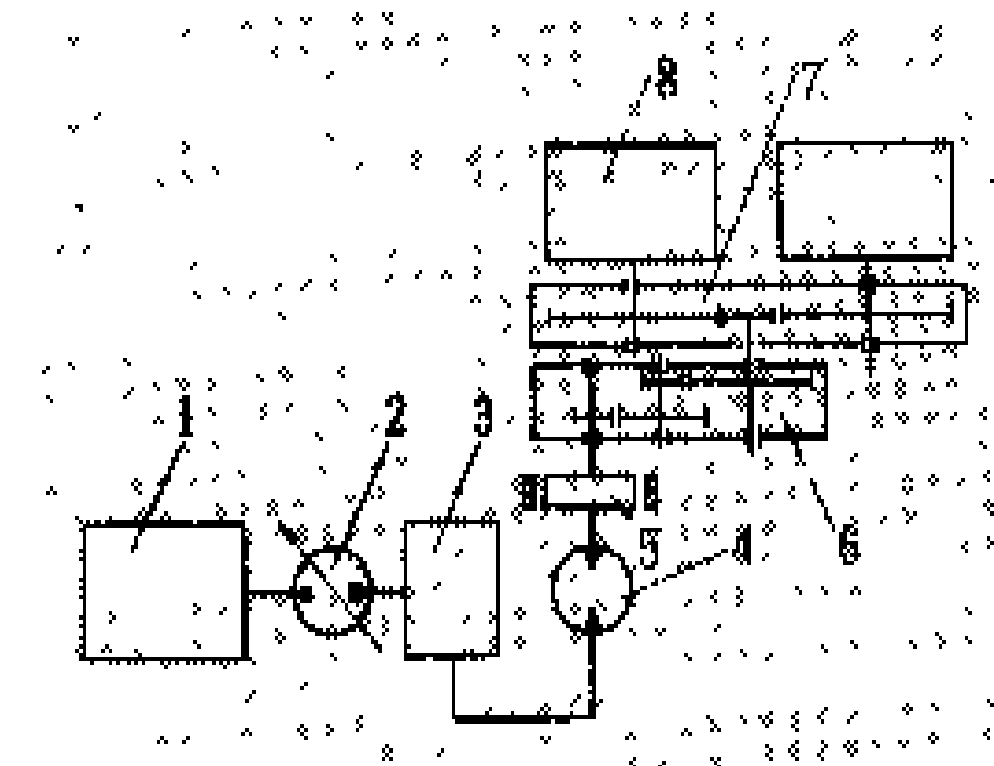


图1 液压传动牵引机示意图  
1—原动机；2—液压泵；3—液压控制回路；4—液压电动机；5—制动器；6—主减速器；7—末级减速器；8—双摩擦牵引卷筒

的，故这种牵引机只能有级变速，且变速时还必须先制动牵引卷筒，然后松开摩擦离合器，才能进行换挡操作。机械传动牵引机的技术性能不及液压和液力传动的牵引机，但其结构简单，造价较低，适用于一般小型

牵引。

**张力机** 在展放导线时，使导线保持一定张紧力，从而避免触及地面及跨越物的机械。根据制动张力的产生方式，张力机可分为液压制动、机械摩擦制动、电磁制动和空气压缩制动等几种形式。根据张力机一次同时展放导线的根数，又分单导线、双导线和四导线三种型式。图2是液压制动张力机的结构示意图。它由双摩擦放线卷筒、增速器、液压电动机（作液压泵运转）、溢流阀、散热器和补油泵等组成。制动张力产生的原理是：导线带动放线卷筒转动，经增速后驱动液压油泵转动，输出液压油，经溢流阀节流时，产生阻力矩，使导线产生张紧力。节流后的油液温度增高，经散热器散热后再回到液压油泵入口处。制动张力的大小是通过溢流阀调节液压泵出口处的压力来实现的，它能实现张力的无级调节。因张力机在放线过程中始终处于被动状态，故放线速度的大小决定于牵引速度的大小。由于液压传动系统的惯量小、起动快、工作平稳等特点，使张力机的液压泵能较好地跟踪适应牵引速度的变化，保持导线的恒定张力和平稳运动。

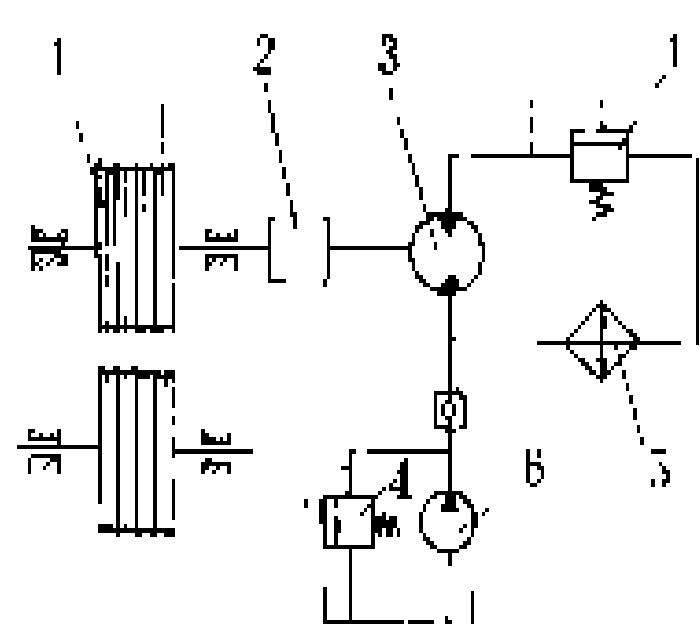


图2 液压制动张力机示意图  
1—双摩擦放线卷筒；2—增速器；3—液压电动机；4—溢流阀；5—散热器；6—补油泵

**机械摩擦制动张力机**通过机械摩擦产生阻力矩。这种张力机放线卷筒直接和摩擦盘（或制动鼓）连动，放线卷筒被拉转动时，摩擦盘亦同时转动，由制动盘和固定摩擦片组成的摩擦副产生阻力矩，阻碍放线卷筒转动，使导线产生张力，张力的大小与施加在摩擦片上的正压力大小成正比。摩擦产生的热量通过专门的散热装置或自然冷却耗散于空气中。在采用具有稳定摩擦系统的摩擦材料时，其性能同液压传动张力机相似，但其结构简单，维护方便。

导线压接机 对导线接头进行压接的机械。压接

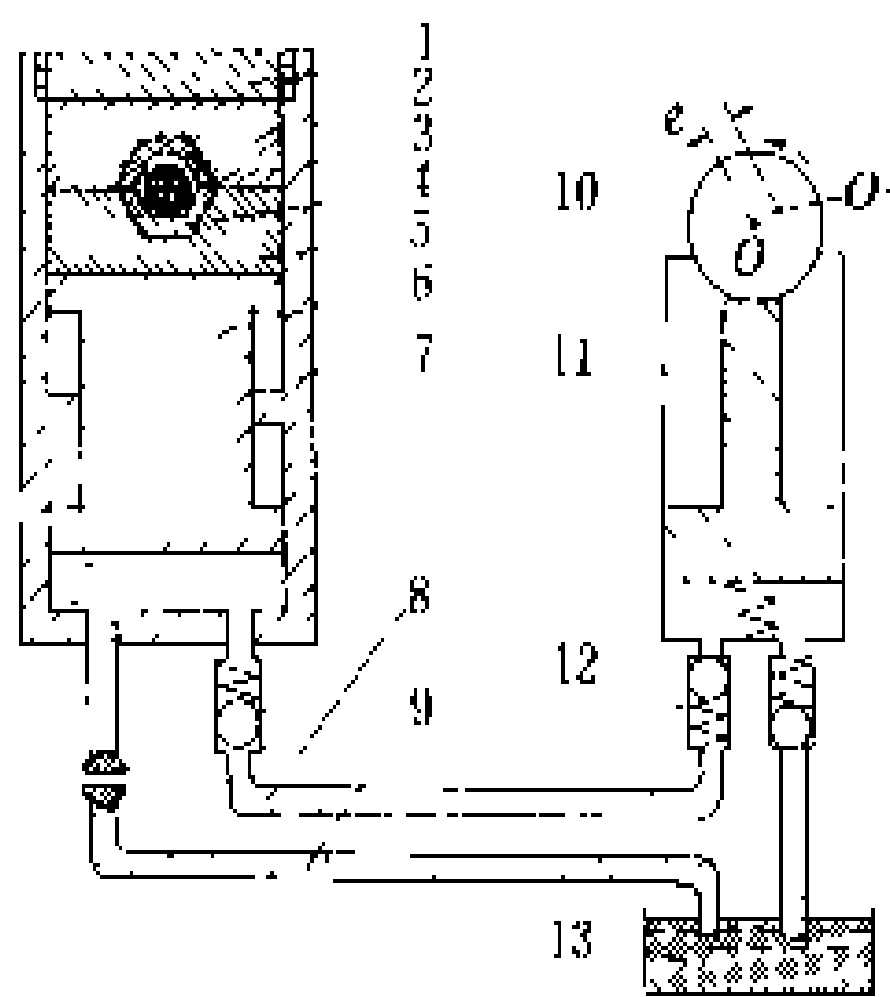


图3 压接机工作原理图

1—上压盖；2—上靠模；3—上压模；4—下压模；5—下靠模；6—活塞；7—缸体；8—高压软管；9—回油管；10—偏心轮；11—柱塞；12—单向阀；13—油箱

导线压接机 对导线接头进行压接的机械。压接

接头应有良好的质量,其机械强度、电气性能应基本与导线相同。导线压接机由液压泵(手动或机动)、高压胶管、类似千斤顶的压接机体和压接模具四大部分组成。图3是导线压接机工作原理图。其工作原理为:由液压泵输出的压力油,经高压胶管进入压接机体,推动活塞使下靠模上移。因压接机体上压盖同缸体借助螺纹或斜齿咬口固定在一起,使上靠模固定不动,故下靠模上移就压缩接续管或耐张线夹,从而完成压接工作。压接机的压接模具根据导线截面积大小有相应的规格,模口的形状一般为正六角形。

放线滑车 挂于放线段内各杆塔上用以支承导线使之顺利展放的工具。根据一次供同时展放导线的数目,放线滑车有单轮、三轮和五轮等类型,其中三轮滑车用于架设双分裂导线,五轮滑车用于架设四分裂导线。放线滑车的中央轮用于通过牵引钢丝绳,对称分布于中央轮两侧的侧轮用于通过导线。为保护导线不被磨伤,导线轮的表而还衬有氯丁橡胶或聚氨脂橡胶等衬垫材料。全部轮子都通过滚动轴承安装在心轴上,心轴两侧由框架支承,框架上部经联板用销轴连接吊挂于绝缘子串下部。

导线轮直径和被展放导线直径的比值称倍率比。倍率比的大小,对放线滑车的性能和导线的展放质量影响很大,倍率比太小,会增加导线线股层间摩擦、弯曲和拉伸作用,导致导线变形、内层线股表面磨伤等现象,滑车回转阻力也有增加。中国放线滑车的倍率比一般取20左右。

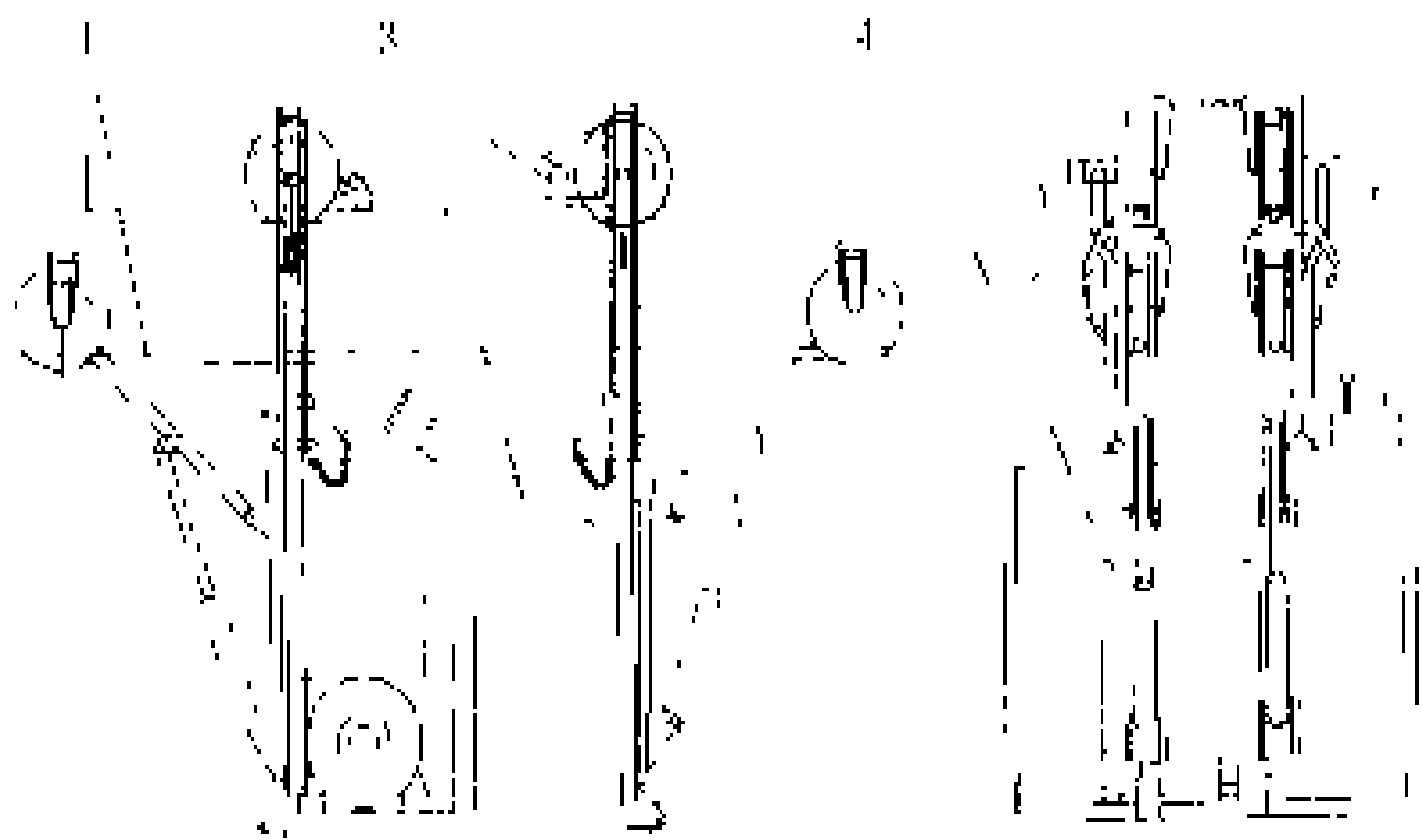


图4 4线机动飞车结构图

1—分裂导线; 2—驱动轮; 3—筐体; 4—汽油机和液压泵总成

飞车 吊挂在导线上并以导线为轨道由人力或动力装置驱动压紧在导线上的行轮使之在导线上行驶的工具。它用于导线间隔棒、防振装置、防舞动装置等附件的安装、维修以及接续管检查等空中作业。人力飞车的驱动方式类似自行车,通过脚蹬、套筒滚子链、链轮驱动。机动飞车由小型汽油机通过液压传动或链传动方式驱动。图4是筐式4线机动飞车结构图。该飞车用

于4分裂导线空中作业,其顶面4个轮子为主动轮,分别与各自的液压电动机同轴相连,通过以汽油机带动的液压泵驱动。飞车行进碰到障碍物(如间隔棒)时,可轮流操作8个轮子,逐个改变它们与导线的分合状态,使4对轮子交替通过障碍物。

(蒋平海)

Jiangsu Hengshan 220 kV biandiansuo

江苏横山 220 kV 变电所 (Hengshan 220kV substation of Jiangsu)

位于中国江苏省苏州市近郊,是华东220 kV电力网东部地区的枢纽变电所,主要向苏州地区供电。全所共有220 kV、110 kV、35 kV三级额定电压。220 kV10回出线(本期1回),110 kV8回出线(本期1回),35 kV10回出线(本期5回),最终安装2台120 MV·A主变压器(本期1台)。1984年8月开始建设,1985年12月投入运行。全所总占地16000 m<sup>2</sup>,总投资604.06万元(1984年)。它具有以下几个特点:①220 kV、110 kV、35 kV配电装置的电气主接线都采用传统的双母线带旁路母线接线,建设初期由于出线回路数较少,它们都采用单母线带旁路母线的简易接线。随着出线回路的增加,逐步过渡到最终的双母线带旁路母线接线。②220 kV、110 kV高压配电装置均采用屋外式软母线高型布置方案,双母线分成两层布置在中间,两组母线隔离开关也分成两层布置,断路器呈双列布置形式,进线和出线回路可以共用一个间隔。高型屋外配电装置采用直径为400 mm的预制环形水泥杆,横梁采用各种型钢组合梁,配电装置结构轻巧,节省三材消耗。与同类型的配电装置相比,钢材消耗量少5.2%,水泥消耗量少22%,木材消耗量少5.5%,单位造价降低12.4%。③全所总平面布置紧凑,由于采用了220 kV、110 kV屋外式高型配电装置以及35 kV屋内配电装置,因此占地面积小。比同类型的220 kV变电所少占地17%,比半高型屋外配电装置布置方案的220 kV变电所少占地14.5%。④工程造价低。本期工程总投资604.06万元,每千伏安造价50.37元,是同类型220 kV变电所造价最低的工程。⑤主控制楼造型新颖,美观大方,与变电所的周围环境配合比较协调。

(蓝增旺)

jiangzuj

降阻剂 (earth-resistance-reducing agent)

在高土壤电阻率地区用来降低接地极接地电阻的物质。对降阻剂的要求是:降阻效果好,长期(20年以上)有效,对接地极的腐蚀微弱,对环境污染小,运输及使用方便,价格便宜。降阻剂的电阻率一般应在

10 Ω·m 以下。

在 20 世纪 50 年代及以前,使用最多的降阻剂是食盐与木炭的混合物,其缺点是有效期不长,数年之内地下水可将食盐冲刷殆尽,而且它对接地极的腐蚀性也较大。60 年代出现由电解质(多为食盐)及胶凝材料相结合组成的长效降阻剂,主要胶凝材料多半为一些高分子有机化合物(如脲醛树脂、丙烯树脂等),它在未固化前的渗透力强,形成树枝效应,有利于在岩石、沙石地渗透降阻,且能耐受地下水的冲刷,在周围土壤干燥时也能保持一定的含水量及导电性。70 年代后期出现了无机长效降阻剂,它的主要原料是石膏、石灰、水泥、石墨及矿渣粉等。这些原料(如石膏和石灰等)比较难以溶解,能在满足电阻率要求的同时保证长效性。石墨是具有低电阻率、高稳定性的物质,它可使降阻剂在较干燥时仍有良好的导电性;水泥、石灰、矿渣粉除了有导电性能外,还起着成型及保持水分的作用。这种无机降阻剂的腐蚀性微弱,对环境无污染。如能就近取材,膨润土也可作为降阻剂使用。膨润土是以蒙脱石为主要成分的粘土岩,能吸附 8~15 倍于自身体积的水量,吸水后膨胀几倍到三十几倍,它的价格便宜,腐蚀性轻微,但其电阻率较大,因而用量较多,运输及施工费用较大。

降阻剂的电阻率远比其周围土壤的电阻率要小,在设计中可认为降阻剂等值加大了接地极的尺寸。在接地极尺寸不太大时,例如在输电线路杆塔的接地装置中,降阻剂可以明显降低接地极的接地电阻。但在接地极的尺寸大时,例如在发电厂和大中型变电所的接地中,由于降阻剂能使地网有效尺寸扩大的百分比很有限,所以降阻剂的作用很小。

(解广润)

jiàolián jùnyǐ diànlǎn

**交联聚乙烯电缆** (cross-linked polyethylene insulated cable) 用物理或化学方法将聚乙烯材料改性后作为绝缘的一种固体挤压聚合电缆,简称 XLPE 电缆。交联聚乙烯电缆可用在各种电压等级的电力电缆线路中。

交联聚乙烯电缆几乎完全保持聚乙烯电缆原有的电气性能,即击穿强度高,绝缘电阻系数大,介电常数小,介质损耗因数低等,并且由于交链状分子结构,使其具有较高的耐热性和耐老化性能。因此,交联聚乙烯电缆的长期允许工作温度可达 90℃,允许过载温度为 130℃,允许短路温度为 250℃。

**物理交联** 用高能粒子射线(如 β 或 γ 射线)或电子束照射聚乙烯,使其成为三维网状分子结构的交联聚乙烯。物理交联多用于绝缘层较薄的电缆。

**化学交联** 在聚乙烯绝缘材料中混入 2%~3% 的过氧化物(简称 DCP 交联剂)和少量的抗老化剂,然后在交联剂的分解温度以下(130~140℃)挤出并包覆于导体外,进入硫化管中进行交联。硫化管的温度在交联剂的分解温度以上,一般为 200~400℃。聚乙烯的挤出和交联同时进行。化学交联又分为蒸汽交联、干法交联和硅烷交联等不同的交联方法。在交联反应中,交联剂分子断开夺取聚乙烯分子中的氢原子,形成具有结合链的聚乙烯分子,它们相互结合而形成交联聚乙烯。

**蒸汽交联** 在硫化管中用蒸汽作为加热和加压媒质的交联方法,也称湿式交联。加热的目的是使交联剂达到分解温度。在交联过程中,过氧化物分解,产生挥发性气体,如甲烷、乙烷、水蒸气等。这些气体在绝缘中能形成直径为 0.001~0.01 mm 的微孔约 10<sup>5</sup> 个/mm<sup>3</sup>,含水量可达 2000~4000 ppm。为了使微孔的尺寸保持在可接受的水平,需要提高蒸汽的压力(1~1.5 MPa)。同时为了使过氧化物全部分解,交联过程需要足够的时间,因此,硫化管要有一定的长度,一般为 70~100 m(管径为 200~250 mm)。交联度取决于加热温度和反应时间,当挤压线速度和温度保持不变时,交联度就取决于硫化管的长度,且越长越经济,有的硫化管长度为 150~200 m。这种交联工艺,因含水量高,使绝缘的电气强度降低,在电场作用下容易产生水树枝,导致绝缘老化而击穿,因此它只适用于生产电压较低

的交联聚乙烯电缆。  
**干法交联** 用气体如氮气或六氟化硫气体代替蒸汽作为传热和传压的媒质,或用气体作为压力媒质而用辐射方法加热电缆绝缘促使交联的方法。用干法交联可使绝缘中的微孔数减少到 (1.5~2) × 10<sup>5</sup> 个/mm<sup>3</sup>,含水量降低到 200~250 ppm,因此绝缘的电气强度比蒸汽交联的提高了 20% 以上,适用于生产较高电压等级的交联聚乙烯电缆。

**硅烷交联** 以少量过氧化物(0.1%DCP)用硅烷触媒剂混入聚乙烯绝缘材料中代替湿式或干法交联的加高温和加高压,使聚乙烯在水中交联的方法。因为用水成低压水蒸汽渗透入聚乙烯中,借助于触媒剂完成交联过程,渗透就需要一定时间(2.5 mm 厚的聚乙烯在 90℃ 水温时需要 4 h),因此硅烷交联只适用于生产绝缘层较薄、电压等级较低的交联聚乙烯电缆。

**化学交联生产线** 交联电缆的生产线主要有悬链线连续硫化、垂直式连续硫化和水平式连续硫化三类。

**悬链线连续硫化** 简称 CCV。硫化管自上而下成悬链式布置,在管中完成交联过程。这是早期交联电缆的生产线。因为绝缘层在交联反应前未能全部固化,又由于自重的原因绝缘容易产生偏心,因此一般只生产



绝缘层外径小于 50 mm 的交联聚乙烯电缆。

垂直式连续硫化 简称 VCV。硫化管自上而下成垂直线布置,在管中完成交联过程。这种生产线避免了悬链式布置产生偏心或擦伤绝缘的缺点,因此适用于生产绝缘层外径较大(30~150 mm)的交联聚乙烯电缆,其生产线速度可达 1~30 m/min。因为交联过程需要有一定时间,硫化管必须达到一定的长度,支持硫化管就需要特殊设计的装备。

水平式连续硫化 简称 HCV。硫化管水平放置,用长承模在高温高压下进行交联。按通过长承模所采用的润滑剂或辅助剂的不同,水平式交联又有阿娜康达交联、MDCV 交联等。水平式交联可保证电缆芯直线移动而不经受弯曲,这就满足了制造大截面导体交联电缆的要求。又因为加热交联与冷却区段是分开的,不会有水分渗入或扩散到绝缘内,因此绝缘近于干燥无微孔,并且电缆外径相当精确,同心度好。因为加热区和冷却区可以分开控制,交联温度可以控制在接近于聚乙烯热老化的临界温度,这样就可加快生产速度和缩小交联设备尺寸。

树枝 交联聚乙烯电缆制造和安装敷设简单,因此发展很快,但其运行可靠性不及油浸纸绝缘电缆。从显微镜中可以观察到在交联聚乙烯电缆的绝缘层中有气隙、杂质或水分以及屏蔽层和绝缘层之间表面不均匀等缺陷,在电场作用下产生局部放电,导致绝缘成树枝状老化面击穿。树枝的形成,因其起因不同又可为电树枝、化学树枝和水树枝。

电树枝 在绝缘层中由于过高的集中场强(如导线表面的毛刺或凸起、绝缘层中杂有金属粉末等)引起的局部放电,导致绝缘成树枝状老化面击穿。如果采用内、外屏蔽层和绝缘层三层同时挤出的方法并使用超纯原材料且规定绝缘层厚度,在正常运行电压下,可以避免电树枝的产生。

化学树枝 没有金属密封护套的交联电缆,如果敷设在含有酸或碱的土壤中,日久后土壤中的化学溶液渗透至电缆绝缘内部,形成灌木状树枝导致绝缘老化而击穿。金属密封套可以隔断化学溶液渗透途径,从而防止化学树枝的形成。

水树枝 以蒸汽或硅烷交联的电缆,其绝缘中存有凝结水,或因外界周围的水分自护层或导体的股线间侵入绝缘内,在电场和温度的作用下导致树枝状老化而击穿。

发展过程及趋势 交联聚乙烯电缆自 20 世纪 60 年代起发展较为迅速,尤其在日本、瑞典、美国等国家发展很快,它不仅在中、低压范围内有取代油浸纸绝缘电缆的趋势,而且在 110~220 kV 电压级也大量应用,如瑞典的 245 kV 系统、日本的 275 kV 系统。在日本,

目前已有 500 kV 级的交联聚乙烯电缆实验性线路。但在电压等级较高的电缆线路中,交联聚乙烯电缆的附件如电缆终端、电缆接头尚不能达到交联电缆绝缘同样的可靠程度,因此目前仍在不断改进中。

参见彩图插页第 29 页 88 图。

参考书目

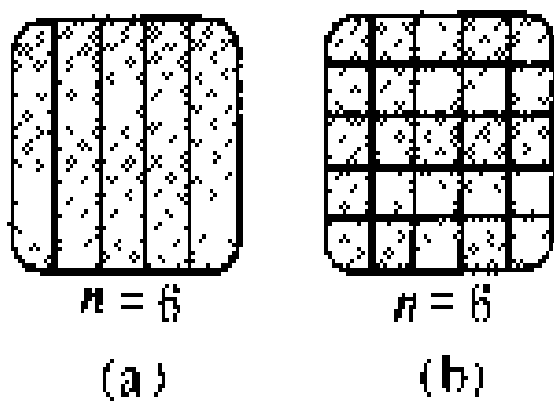
刘子玉, 电气绝缘结构设计原理, 北京: 机械工业出版社, 1981  
Tanaka T, Greenwood A. Advanced Power Cable Technology. CRC Press Inc, 1983

(桑纪明)

jiāoliú dìwǎng

交流地网 (alternating current grounding grid)

埋设在发电厂、变电所地中的网格形接地体。交流地网一般以埋深为 0.6~0.8 m 的水平接地体为主,在防雷装置的近旁加有 3~5 根 2.5~3 m 长的垂直接地体。交流地网内应敷设足够数量的均压带以使地网范围内地面的电位比较均匀,达到降低接触电动势的目的。均压带的间距在 5~10 m 的范围内。交流地网的外缘应闭合,外缘各角应做成圆弧形,以使地网外侧地面的电位比较均匀,达到降低跨步电动势的目的,圆弧的半径可取均压带间距的一半。均压带的总根数(包括周围四根)在 18 根及以下时,用长孔地网[见图(a)]较为经济,在 19 根及以上时,用方孔地网[见图(b)]较为经济。



交流地网  
(a) 长孔地网; (b) 方孔地网

为了降低接触电压和跨步电压,可在地网内和边缘经常有人出入的走道处铺设砾石或沥青路面,也可在地网边缘的路面地下装设两条与地网相连的“帽檐式”均压带。

(解广润)

jiāoliú diǎnyǎ shíyàn

交流电压试验 (alternating voltage tests)

检验电力设备及绝缘材料耐受各种交流电压作用能力的试验。除了特指频率的试验外,它通常是指工频电压试验,包括额定工频耐受电压试验、长时间工频试验、局部放电试验及破坏性放电试验。局部放电试验常和长时间工频试验一起进行。对于设备外绝缘的试验,按照表面状态不同,分为干试验、湿试验与人工污秽试验。

试验设备 用于工频电压试验的设备应能提供频率为 48~62 Hz 的电压,其波形应接近正弦波形,正、

负两个半波应完全一样,且峰值与均方根值之比应在 $\sqrt{2} \pm 0.07$ 范围内。通常使用的试验设备主要是试验变压器及高电压谐振试验装置。

试验变压器能适用于变压器、断路器、绝缘子等不同被试品以及外绝缘干、湿、污秽等各种试验。为使预放电电流不至于引起电源回路内部过大的压降,从而影响试验结果,必须保证电源有足够的容量。为此,标准规定:对外绝缘进行干试验,短路电流应不小于0.1 A;湿试验,不小于0.5 A;人工污秽试验,则根据电源回路的电阻与稳态电抗的不同比值,要求短路电流分别为6~12 A。对于放电后易造成绝缘损伤又难以恢复的SF<sub>6</sub>气体绝缘的电气设备,最好采用串联谐振试验装置进行试验,不采用试验变压器。

高电压谐振试验装置是近30年来发展起来的,它也有较广的适用性,并特别适用于电力电缆、电容器等泄漏电流与电容电流的比值较小的被试品。如被试品泄漏电流较大,则会破坏谐振条件,因此,不宜用谐振试验装置进行外绝缘的湿试验及人工污秽试验。由于被试品放电时回路立即失谐,被试品不会过分损伤,所以,用串联谐振试验装置进行SF<sub>6</sub>气体绝缘的电气设备的工频电压试验比较合适。

**额定工频耐受电压试验** 检验500 kV及以下电力设备在工频运行电压、暂时过电压下的绝缘性能的试验。对220 kV及以下的电力设备也用它来检验操作过电压下的绝缘性能。试验时,按规定将被试品接入试验回路,逐步升高电压直至标准规定的额定工频耐受电压值,保持1 min,然后迅速降低电压。如果在规定时间内,被试品的绝缘未发生击穿及表面闪络,则认为通过了该项试验。这种试验常被列为产品型式试验及出厂试验的项目之一。

**长时间工频试验** 检验在工频运行电压及暂时过电压下电气设备的内绝缘对老化或外绝缘对污秽的适应性的试验。试验电压一般高于三相系统的最高电压,远低于额定工频耐受电压。其试验电压值及试验方法随设备的类型而异,在有关的设备标准中都有具体规定。

**破坏性放电试验** 测定使电力设备绝缘或绝缘材料丧失介质强度的电压值的试验。破坏性放电沿固体绝缘表面发生时称作闪络,在气体、固体或液体介质中发生时称作击穿。该试验一般用于具有自恢复性能的外绝缘产品的型式试验和出厂试验,也用于研制产品时内绝缘的选材试验和模型试验。破坏性放电具有分散性,因此,以几次放电电压值的算术平均值作为放电电压值,该值可作为判断产品质量及评估绝缘裕度的依据。

有关标准或规程中规定的试验电压值是指在标准

大气条件下的值,如试验不是在标准条件下进行,对于外绝缘,应进行大气条件修正。(见高压电力设备绝缘试验)

另外,用150 Hz电压检验变压器匝间绝缘的三倍频电压试验以及用0.1 Hz电压检验发电机线棒绝缘的超低频电压试验也属于交流电压试验。

#### 参考书目

张仁豫等,高电压试验技术,北京:清华大学出版社,1982

(王如璋)

#### 交流仪表

(alternating current instruments) 测量、记录和计量各种交流电学量的表计和仪器。交流仪表主要有交流电流表、交流电压表、交流功率表、无功功率表、电能表、无功电能表、功率因素表、频率表、变换器式仪表、整流式仪表、数字仪表、谐波分析仪、谐波流向仪和接地电阻测量仪等。

**交流电流表** 采用电磁系或电动系测量机构,用以测量交流电路中的电流。电磁系电流表的测量范围由几十毫安到几十安,对更大的电流则需要配置电流互感器。安装在配电屏(柜、箱)上的电流表一般选用1.5或2.5准确级别。电动系电流表的测量范围由几十毫安到10 A左右,主要制成0.2、0.5级便携式电流表,用于精密测量或作为校验低准确级别电流表的标准表。电动系电流表通常是交、直流两用的。

**交流电压表** 由小电流量程的电磁系或电动系电流表串联适当的附加电阻而构成,用以测量交流电路中的电压。测量范围由十几伏到几百伏,对更高的电压则需要配置电压互感器。安装在配电屏(柜、箱)上的电磁系电压表一般选用1.5或2.5准确级别。电动系电压表多制成0.2、0.5准确级别便携式电压表,用于精密测量或校验低准确级别电压表的标准表。电动系电压表也是交、直流两用的。

**交流功率表** 用于测量交流电路的功率,有单相功率表和三相功率表。

单相功率表采用电动系测量机构,其固定线圈通以被测相电流,可动线圈串联附加电阻后接到被测相电压上。电流测量范围为0.5~10 A,电压测量范围由几十伏到几百伏,对大电流和高电压系统要配合电流互感器和电压互感器使用,其二次侧的额定电流和电压分别为5 A和100 V。单相功率表的准确级别一般有0.2、0.5、1.0、1.5、2.5等,低准确级别的功率表用于配电屏(柜、箱),高准确级别的用于精密测量或校验低准确级别功率表的标准表。电动系功率表

为交、直流两用。

三相功率表在用于三相四线制系统时采用三元件三相功率表，由三个单相功率表组装在一起，其可动部分共轴带动一个指针，指示的为三相总功率。用于三相三线制系统时采用二元件三相功率表，由二个单相功率表组装在一起，其可动部分共轴带动一个指针，分别接在两个线电流和跨第三相的线电压上，指示的为三相总功率。

无功功率表 用于测量交流电路的无功功率。单相正弦无功功率仍可采用电动系功率表的测量机构进行测量，只要将所加电压相量移后于电流  $90^\circ$  或将电流相量移前于电压  $90^\circ$ ，一般采用前一种方式。用于负荷基本平衡的三相电路时，采用三元件三相无功功率表，由三个单相无功功率单元组装在一起，其可动部分共轴，分别接到线电流和线电压上，指示的为三相总无功功率。

电能表 用于积算交流电路的电能量，单位为  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。采用感应系测量机构（见电气测量仪表）。

对于三相四线制系统与三相三线制系统，总电能的测量可用三元件及两元件的三相电能表。其电流线圈和电压线圈的连接方式与对应的三相功率表相同，仅以感应系测量机构代替电动系测量机构，将各元件的铝盘共轴用一个计度器记录三相总电能量。感应系电能表的准确级别有 0.5、1.0、2.0 和 3.0。

无功电能表 用以积算交流电路的无功电能量，单位为  $\text{kvar} \cdot \text{h}$ 。采用感应系测量机构，其结构原理同有功电能表，其电流线圈和电压线圈的连接方式与对应的三相无功功率表相同。

功率因数表 用以测量交流电路的功率因数。采用电动系测量机构，将两个可动线圈交叉固定在一起，其一通以电流时与固定线圈产生的磁场相互作用而形成偏转力矩，另一可动线圈通以电流时产生反方向力矩，代替了游丝所提供的反抗力矩。可动部分停留的位置，即指针的指示位置，与两可动线圈中的电流比有关，故又称电动系流比计。在形成功率因数表时，两可动线圈分别串联电阻和电感（或电容），再并接到电压上。如此，指针所指示位置即反映电压与电流间的相位关系。标度盘上以功率因数刻度，将功率因数为 1（即电压与电流同相）标在刻度盘正中，指针向右偏表示电流滞后于电压情况，指针向左偏表示电流超前于电压。对于负荷平衡的三相三线制系统，通常采用三相功率因数表。

频率表 用以测量交流电路的频率。采用电动系流比计测量机构，并配以电阻、电容、电感元件组成的测量线路而构成。在形成频率表时，其结构原理与

功率因数表类似，但两可动线圈互相交叉的角度为  $90^\circ$ 。当频率变化时，引起容抗和感抗的变化，使线圈电流发生变化，从而使转矩和偏转角改变。刻度由 45 ~ 55 Hz，误差不超过  $\pm 0.25\%$ 。

变换器式仪表 采用磁电系测量机构，配以半导体二极管组成的变换电路，将被测的各种交流电学量变换成相应的直流电压或电流后进行测量的一种指示仪表。

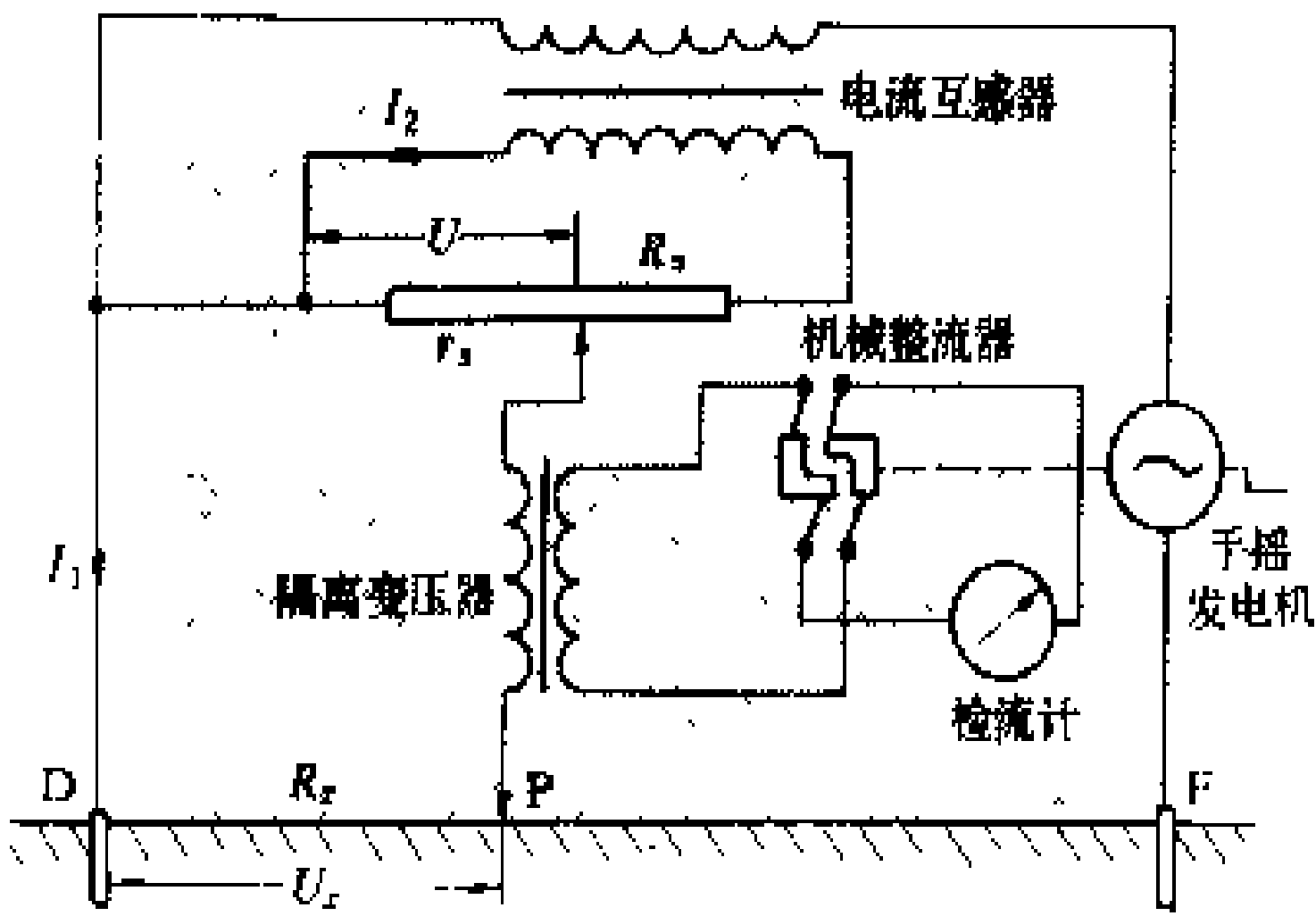
由于统一采用磁电系测量机构，使此类仪表的工艺大为简化。近年来发展了广角度（ $240^\circ$ ）的变换器式交流仪表，如电压表、电流表、功率表、无功功率表、功率因数表、频率表、同步指示表等。除功率表外，一般无需辅助电源。准确级别为 1.5 级，功率表为 2.5 级。

整流式仪表 利用磁电系测量机构，配以半导体二极管组成的整流电路，将被测的交流电压整流成直流电压后进行测量的一种指示仪表。主要用以构成万用表、电流表、电压表和频率表等。

数字仪表 利用电子电路将被测的各种交流模拟量通过模数转换和逻辑控制，自动地以数字形式直接显示出来的仪表。常用的有数字电压表、数字频率表、数字相位表和数字功率表等。

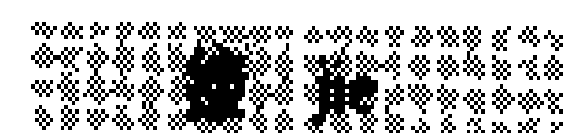
谐波分析仪 用以监测畸变波形中谐波成分的仪表。有模拟式及数字式两类；模拟式谐波分析仪是利用带通滤波器将各次谐波的幅值分离出来，但不能确定各次谐波间的相位关系；数字式谐波分析仪是利用采样及模数转换原理，结合应用微机，可分离出各次谐波的幅值和相位，还可进一步计算出各次谐波的有功功率及无功功率等。

谐波流向仪 用以测定谐波功率的流向，以判断谐波源位置的仪表。



接地电阻测量仪原理线路图

接地电阻测量仪 用以测量接地装置的接地电阻的仪表，又称接地摇表。采用交流供电，以避免直流引起的极化作用，交流频率为几十赫兹到百余赫兹，电阻的测量范围低于  $1000 \Omega$ 。如图所示为采用补



偿原理的线路图,手摇发电机产生的交流电压,使电流  $I_1$  通过电流互感器的一次侧经接地极 D 及 F 形成回路,P 为电位极,电极 D 与 P 之间的电阻  $R_x$  即为待测的接地电阻.电流互感器二次侧的电流  $I_2$  流过滑线电阻  $R_s$ ,移动滑线电阻的滑动端,令  $r_s$  上的电压与  $R_x$  上的电压相等,于是隔离变压器的一次侧及二次侧的电流均为零,这可由机械整流器及检流计的组合电路检测出来.据此有  $R_x = Kr_s$ ,  $K = I_2/I_1$  为电流互感器的电流比。

见电气测量仪表。  
(唐统一)

jiaozhiliu shudian binglian yunxing  
**交直流输电并联运行** (parallel operation of AC and DC transmissions) 两个交流电力系统之间既有交流输电线联网又有直流输电线相联而形成的交流输电与直流输电彼此并联的联网运行方式。交流输电和直流输电的起点,可以是在送端电网的同一点,也可以是不同地点;其终点往往是在受端电网的不同地点,也可以是同一点.这种输电方式,亦常称交直流混合输电.由于两个电力系统间有交流输电线相联,仍属同步联网,两个电力系统具有相同的频率,但在运行上却与纯交流联网有不同的特点。

交直流并联联网运行,总是在先有交流输电线联网的情况下,后加直流输电线而形成的.先有直流后有交流的例子很少.当两个相距甚远的电力系统间已有交流输电联网而又需要增加联网的输电容量时,面临着增设同样的交流输电联网线路,还是增加直流输电联网线路的抉择问题.增设交流输电联网线路有三个问题需要考虑:①若起点、落点均与原输电线不同,则存在环流问题;②即使起落点均相同,也存在增大短路电流容量问题;③新增输电线的输送容量必然受系统稳定、网络参数等因素的限制,不可能充分利用.而增设直流输电联网线路不但可避免上述缺点,而且可用直流输电联网线路附加控制系统进行直流调制,能够抑制两个电力系统间的振荡,甚至还能增加原有交流输电联网线路的输送容量.因此,在技术经济比较中,增设直流输电联网线路方案,往往是有利的。

直流调制的原理是在直流输电的控制系统中加入附加的直流调制器,从并联的交流输电联网线路上取得反映交流输电联网线路是否异常(如功率大幅度突变、振荡等)的信号,来调节控制直流输电线路的功率,使之快速吸收或补偿交流输电联网线路的功率过剩或缺额,起到阻尼作用,从而消除交流输电联网线路上的功率振荡和不稳定因素,并提高交流输电联

网线路的输送容量。  
直流调制的效果与整个系统的结构有关。一般地讲,直流输电联网线路的容量相对于与之并联的交流输电联网线路的容量(或被联系统的容量)的比例愈大,调制的效果愈好.此外,直流调制的效果也与其在系统中的位置以及调制器本身的设计参数有关。

直流调制有大、小方式之分.大方式调制的目的在于提高交流输电联网线路的暂态稳定性,直流功率调制幅度达 20%~50%。采用大方式调制,直流换流装置应留有相应的裕度,因为换流器的过载能力很小.小方式调制的目的在于提高交流输电联网线路的动态稳定性,抑制功率振荡,其直流功率调制幅度一般只有 3%~10%。

直流调制最早应用于加拿大的魁北克和新不伦斯维克两省之间的交直流并联联网工程中,效果良好.20 世纪 60 年代中叶,美国西部的太平洋联络线双回 500 kV 交流输电线投产后,连续于 1968、1969、1970 年在重负荷情况下产生低频振荡,1970 年增设并联的±400 kV、1440 MW、1372 km 的直流输电联网线路后,采用了小方式直流调制措施,调制幅值为 3% (±40 MW),起到了抑制低频振荡的作用,还使原来的交流输电联网线路的输送容量由 2100 MW 增加到 2500 MW。这是目前应用最成功的实例。

参考书目  
Cresap R L et al. Small-Signal Modulation of the Pacific HVDC Intertie. In: IEEE PAS-95 No2, 1976  
(何大愚 费翊群)

jiechu diandongshi  
**接触电动势** (touch potential-difference)  
见接触电压。

jiechu dianya  
**接触电压** (touch voltage) 电流自接地电极经周围土壤流散时,会在土壤中产生压降并形成一定的地表电位分布.当人站立于接地电极附近的地面上用手去接触接地导体时,人的手和脚将具有不同的电位.地面上离设备水平距离为 0.8 m 处与设备外壳地面高 1.8 m 处两点间的电位差称接触电动势,用  $E_t$  表示,人接触该两点时,人的手和脚之间所承受的电压称为接触电压,用  $U_t$  表示.  $E_t$  和  $U_t$  间的关系按图由下式决定

$$U_t = \frac{R_b}{R_b + 0.5R_0} E_t = \frac{R_b}{R_b + 1.5\rho} E_t$$

式中  $R_0$  为人的每只脚和土壤间的接触电阻,  $\Omega$ , 可写

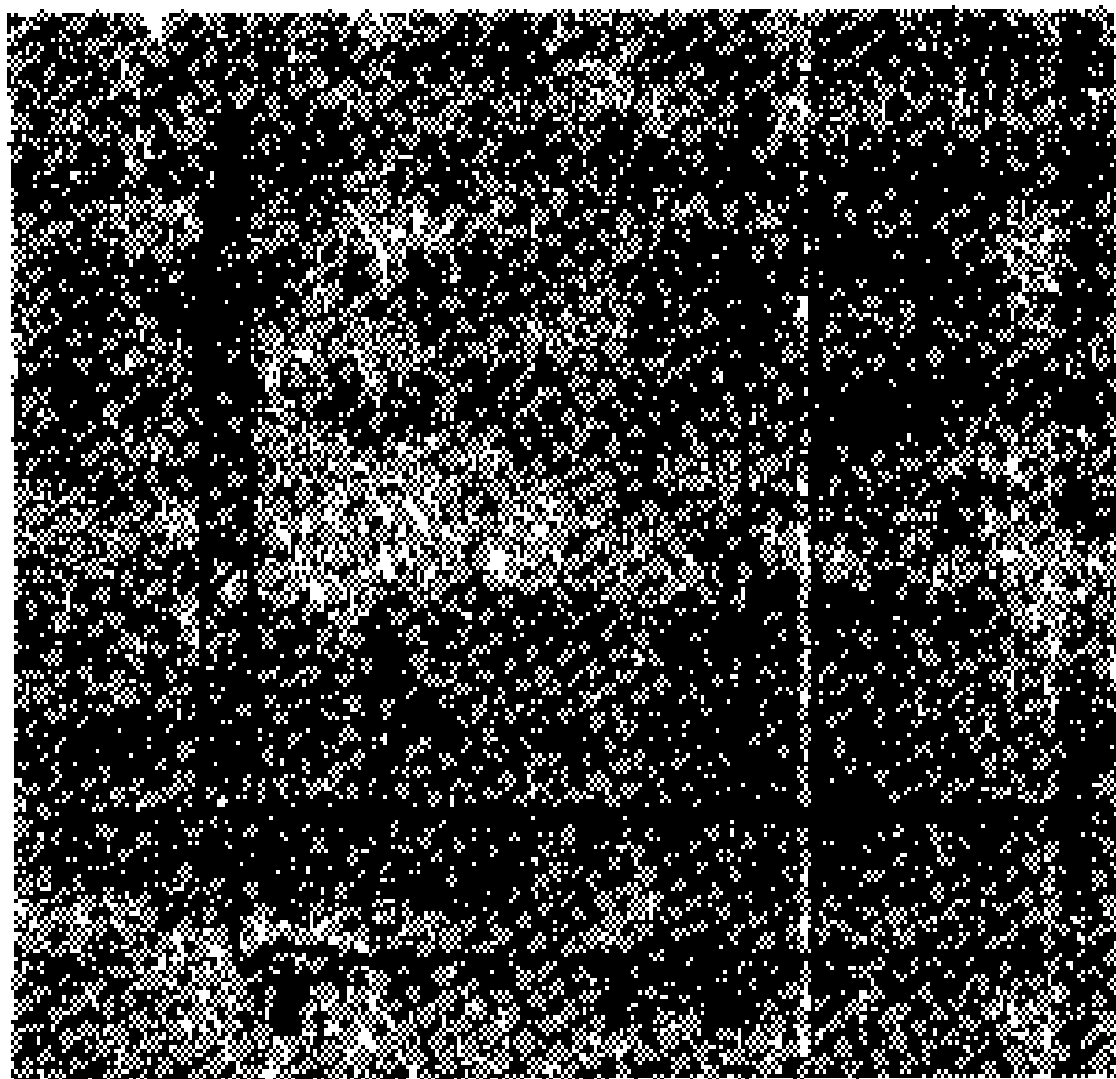
成  $R_0=3\rho$ ;  $R_0$  为人体的电阻,  $\Omega$ ;  $\rho$  为土壤的电阻率,  $\Omega\cdot\text{m}$ 。

最大接触电动势  $E_{\text{im}}$  和相应的电极 (或地网) 电位  $IR$  ( $I$  为经电极或地网流散的电流,  $R$  为电极或地网的接地电阻) 的比值称为接触电动势系数  $K_i$ , 即

$$K_i = \frac{E_{\text{im}}}{IR}$$

在地网中当人站在网孔中心附近地面用手去接触

接地的金属导体时, 作用在人的手和脚之间的电位差叫网孔电动势。考虑到最严重的情况, 地网的最大网孔电动势也就是最大接触电动势。



方孔地网 接触电压和接触电动势间的关系的最大接触电动势出现在地网的边角网孔处。长孔地网的最大接触电动势出现在相当于方格网孔边角孔的地方。地网边角网孔的接触电动势系数  $K_i$  可用下式求出

$$K_i = K_n \cdot K_d \cdot K_s$$

式中各系数的值列于表中。

计算接触电动势系数  $K_i$  时的各个系数值

系 数	地 网 型 式		
	长孔地网	方孔地网	
考虑均压带(水平接地带)根数 $n$ 影响的系数 $K_n$	$\frac{0.97}{n} + 0.096$	$\frac{1.03}{n} + 0.047$	当 $n \leq 9$ 时
	$\frac{0.545}{n} + 0.137$	$\frac{0.55}{n} + 0.105$	当 $n \geq 10$ 时
考虑接地导体直径 $d$ 值影响的系数 $K_d$	$1.2 - 10d$		$d$ 的单位为 $\text{mm}$
考虑接地网面积 $S$ 值影响的系数 $K_s$	$0.654$		当 $S \leq 256 \text{ m}^2$ 时
	$1.23 - 0.23 \frac{40}{\sqrt{S}}$		当 $S > 256 \text{ m}^2$ 时

接触电动势的大小不应危及人身的安全。在大接地短路电流系统中, 接触电动势的允许值  $E_p$  为

$$E_p = \frac{250 + 0.25\rho_0}{\sqrt{t}}, \text{ V}$$

式中  $\rho_0$  为人脚站立处地表面的土壤电阻率,  $\Omega\cdot\text{m}$ ;  $t$  为接地短路电流的持续时间,  $\text{s}$ 。

对 500 kV 系统的地网,  $E_p$  取

$$E_p = \frac{174 + 0.17\rho_0}{\sqrt{t}}, \text{ V}$$

在小接地短路电流系统中, 接触电动势的允许值为

$$E_p = 50 + 0.05\rho_0, \text{ V}$$

在地面铺设沥青混凝土或碎石可以提高  $\rho_0$ , 从而提高  $E_p$  的数值。

(解广润)

接地

(grounding) 将电气设备的某些部分用导线 (接地线) 与埋设在土壤中或水中的金属导体 (接地体或接地极) 相连接。接地体与接地线总称为接地装置。

分类 按其作用不同分为工作接地, 保护接地, 防雷接地和防静电接地四种。

工作接地 电气设备因为正常工作或排除故障的需要, 将电路中的某一点接地。例如在 110 kV 及以上的电力系统中将部分变压器的中性点接地。

保护接地 又称安全接地。当电气设备的绝缘发生损坏时, 其金属外壳或架构可能带电, 为了防止人身碰及时引起触电, 必须将电气设备的金属外壳或架构接地。

防雷接地 为了使雷电流泄入大地将防雷设备接地。例如避雷针、避雷线和避雷器的接地等。

防静电接地 为了防止静电危险影响而设的接地。如运油车, 储油罐和输油管道的接地等。

一般要求 电力系统中电气设备的下列金属部分, 除另有规定者外, 均应接地或接零 (与零线相连接): ①电机、变压器、电器、耦合电容器、电抗器和照明器具等的底座及外壳; ②电气设备的传动装置; ③互感器的二次绕组; ④配电盘与控制台的框架; ⑤屋内外配电装置的金属架构和钢筋混凝土架构以及靠近带电部分的金属围栏和金属门; ⑥交、直流电力电缆接线盒、终端盒的外壳和电缆的外皮, 穿线的钢管等; ⑦装有避雷线的电力线路的杆塔; ⑧在非沥青地面的居民区内, 无避雷线小接地短路电流架空电力线路的金属杆塔和钢筋混凝土杆塔; ⑨装在配电线路上的开关设备、电容器等电力设备的底座及外壳; ⑩铠装控制电缆的外皮、非铠装或非金属护套电缆的 1~2 根屏蔽芯线。

电力设备的下列金属部分, 除另有规定者外, 不

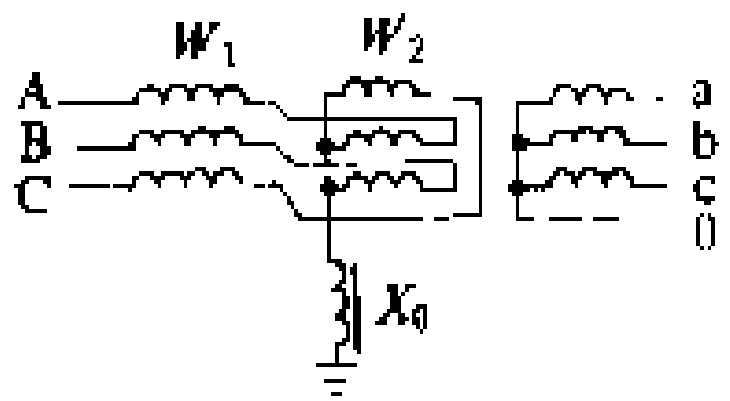






用于电力系统无中性点引出的处所，供连接消弧线圈或接地电阻，也可为单相负荷提供电源。接地变压器的容量与所接消弧线圈或接地电阻的容量之间及其二次侧电压与所接电阻和电压继电器额定电压之间要合理地匹配。

ZN形接线的接地变压器的每相绕组由两段组成，分别绕在不同的铁芯柱上，其匝数为 $W_1=W_2$ ，每柱的零序磁动势近乎为零，即 $I_0W_1-I_0W_2=0$ 。YN,d接线的接地变压器，可在其二次侧开口三角中串联电阻 $R$ ，以形成零序阻性电流，为单相接地故障提供保护（见图1）。在中性点非有效接地的电力系统中，通常采用三相ZN形接地变压器或（ZN,yn）接线的接地变压器（见图2），其零序阻抗小，补偿能力强。接地变压器的中性点可供连接消弧线圈（ $X_0$ ），其二次侧还可供连接动力和照明负荷，使接地变压器的容量得到充分利用。



（满文宗）

jiedi dianzu

**接地电阻**（earthing resistance） 电流 $I$ 经接地体流入大地时接地体的电位 $U$ 和 $I$ 的比值。在工频（或直流）电流经接地体流入大地时，接地电阻即为接地体到无穷远处的土壤的总电阻。在冲击电流经接地体流入大地时，接地体上最大电压出现的时刻不一定是电流最大的时刻，此时的接地电阻定义为接地体的最大电压和经接地体入地的最大电流的比值，称为冲击接地电阻。直流（或工频）接地电阻可用恒流场求出。

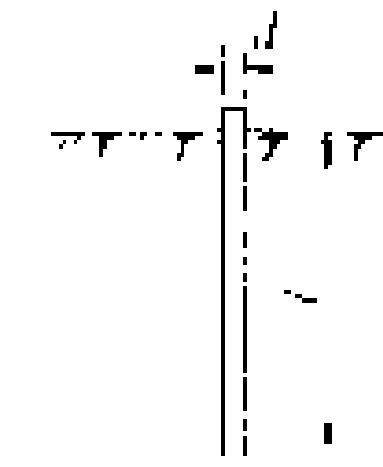


图1 单根垂直接地体  
直接地体 接地电阻计算 单根垂直接地体（见图1）的工频接地电阻为

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{d} - 0.31 \right), \Omega \quad (1)$$

式中 $\rho$ 为土壤电阻率， $\Omega \cdot m$ ； $d$ 为接地体的直径， $m$ ； $l$ 为接地体的长度， $m$ 。

$n$ 根垂直接地体并联后，总的接地电阻 $R_n$ 并不是单根垂直接地体接地电阻 $R$ 的 $\frac{1}{n}$ ，写成下式

$$R_n = \frac{R}{n\eta} \quad (2)$$

式中 $\eta \leq 1$ ，叫做利用系数。当相邻接地体之间的距离

为接地体长度 $l$ 的两倍时， $\eta$ 值约为0.9（两根并联时）或0.7（六根并联时）。

水平接地体的工频接地电阻为

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{L^2}{dh} + A \right), \Omega \quad (3)$$

式中 $L$ 为接地体的总长度， $m$ ； $h$ 为接地体的埋深， $m$ ； $A$ 为形状系数，其值列于表1。

发电厂、变电所地网的工频接地电阻可按下面的经验公式粗略估算

$$R = \frac{0.443\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L} \approx 0.5 \frac{\rho}{\sqrt{S}}, \Omega \quad (4)$$

式中 $L$ 为接地体的总长度（包括水平的和垂直的）， $m$ ； $S$ 为地网的面积， $m^2$ 。

表1 形状系数

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
水平接地体形状		L	Y	○	+	⊥	*	*
形状系数A	-0.6	-0.18	0	0.48	0.89	1	3.03	5.65

集中的人工接地体或自然接地体的冲击接地电阻 $R_i$ 可按式估算

$$R_i = \alpha R \quad (5)$$

式中 $R$ 为工频接地电阻； $\alpha$ 为冲击系数，其值可由以下经验公式求得

$$\alpha = \frac{1}{0.9 + \beta \frac{(I\rho)^m}{l^{1.2}}} \quad (6)$$

式中 $I$ 为冲击电流幅值， $kA$ ； $l$ 为垂直或水平接地体的长度，或环形闭合接地体的直径，或方形闭合接地体的边长， $m$ ； $\beta$ 、 $m$ 为与接地体形状有关的系数。对垂直接地体， $\beta=0.9$ ， $m=0.8$ ；对水平及闭合接地体， $\beta=2.2$ ， $m=0.9$ 。 $\alpha$ 值一般小于1，但当接地体的长度太大时也可能大于1。

网格式地网的冲击接地电阻主要取决于土壤电阻率，和地网的大小关系不大，但和网孔为方形或长形关系较大，也和雷击点的位置有关。雷击方孔地网中心（图2中A点）时的冲击接地电阻一般为2~4 $\Omega$ 。雷击边角（图2中B点）时的冲击接地电阻约为雷击中心时的两倍。雷击边线中心（图2中C点）时的冲击接地电阻约为雷击中心时的1.5倍。长孔地网的冲击接地电阻比方孔地网大。

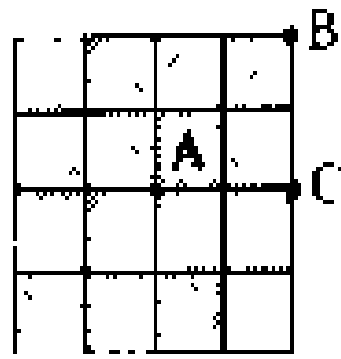


图2 方孔地网的雷击点

对接地电阻的要求 发电厂、变电所地网的接地电阻要保证在接地故障时经接地网流入地中的故障电

流  $I$  在接地电阻  $R$  上造成的电位升高  $IR$  不致危及设备的绝缘, 还应保证工作人员所受的跨步电动势和接触电动势不超过安全值。在中国, 大接地短路电流系统的接地电阻按下式要求

$$R \leq \frac{2000}{I}, \Omega \tag{7}$$

式中  $I$  为经地网流入地中的最大短路电流周期性分量起始值, A。当  $I > 4000$  A 时, 可取  $R \leq 0.5 \Omega$ 。小接

地短路电流系统的接地电阻按下式要求

$$R \leq \frac{250}{I}, \Omega \quad (\text{仅用于高压电力设备的接地装置}) \tag{8}$$

$$R \leq \frac{120}{I}, \Omega \quad (\text{用于与低压电力设备共用的接地装置}) \tag{9}$$

式中  $I$  为经地网入地的故障电流, A。然而即使  $I$  较小时,  $R$  的值也不宜超过  $10 \Omega$ 。

各种常用接地装置的接地电阻允许值见表 2。

表 2 各种接地装置的接地电阻允许值

电压等级		接地装置使用条件	允许的工频接地电阻值 ( $\Omega$ )	备 注
架空电力线路的接地	35 kV 及以上有避雷线的一般线路	土壤电阻率 ( $\rho \cdot s$ )		
		100 及以下 100 以上至 500 500 以上至 1000 1000 以上至 2000	一般不应超过: 10 15 20 25	
	大跨越档	2000 以上	30 $\Omega$ ; 或敷设 6~8 根射线 (总长不超过 500 m), 或连续伸长接地, 电阻值不作规定	
		有避雷线线路的杆塔和管型避雷器或间隙 无避雷线线路的管型避雷器或间隙	不应超过一般线路接地电阻值的 50%, 在高土壤电阻率地区, 也不宜超过 20	
	无避雷线线路的一般杆塔	35 kV 及以上小接地短路电流系统中, 无避雷线线路的钢筋混凝土杆、金属杆塔及木杆线路中的铁横担接地	年平均雷暴日在 40 以上地区一般不应超过 30 ( $\rho \leq 100 \Omega \cdot m$ 的地区, 钢筋混凝土杆、金属杆塔, 可不另作接地)	运行经验证明, 雷击跳闸及断线事故不多的地区, 以及 40 雷暴日及以下的地区, 电阻值不规定, 或不设人工接地装置
		3 kV 及以上小接地短路电流系统中, 居民区的钢筋混凝土杆、金属杆塔	一般不超过 30	有运行经验, 未发生触电事故的地区以及沥青路面上的杆塔, 可不接地
		小接地短路电流系统中, 低压线路的钢筋混凝土杆和金属杆塔	一般不超过 50	1. 大接地短路电流系统中的金属杆塔、混凝土杆的钢筋、铁横担, 只与零线连接即可; 2. 凡属上栏备注情况可不接地或不与零线连接
		低压架空线路零线的每一重复接地 (其并列运行电气设备的总容量为 100 kV·A 以上)	不应大于 10	
		低压架空线路零线的每一重复接地 (重复接地不少于 3 处, 且并列运行电气设备总容量为 100 kV·A 及以下)	不应大于 30	
		低压接户线的绝缘子铁脚接地	一般不大于 30 ( $\rho \leq 100 \Omega \cdot m$ 的地区, 钢筋混凝土杆、金属杆塔, 可不另做人工接地)	年平均雷暴日不超过 30 的地区, 低压线路受建筑物等屏蔽的地区, 以及接户线距低压干线接地点不超过 50 m 的地方, 绝缘子铁脚都可不接地

续表

类型		接地装置使用条件	允许的工作接地电阻值 (Ω)	备 注
电力设备的接地	1 kV 及以上的设备	大接地短路电流系统	一般应符合 $R \leq 2000/I$ 当 $I > 4000 \text{ A}$ 时, 可取 $R \leq 0.5$	高土壤电阻率地区, 接地电阻允许提高, 但不应超过 $5 \Omega$
		小接地短路电流系统: 高低压设备共用接地 仅用于高压设备的接地	$R \leq 120/I$ $R \leq 250/I$ } 但一般不应大于 10	高土壤电阻率地区, $R$ 允许提高, 但不应超过: 发电厂、变电所 $15 \Omega$ , 其余 $30 \Omega$
	低压设备	中性点直接接地与非直接接地时: 并联运行电气设备的总容量为 $100 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 以上时	一般不应大于 4	高土壤电阻率地区, $R$ 允许提高, 但不应超过 $30 \Omega$
		并联运行电气设备的总容量不超过 $100 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 时	可不大于 10	
建筑物防雷装置的接地	利用大地作导线的电气设备	利用大地作相线、回线或零线时: 永久性工作接地 临时性工作接地 线路分相带电作业时作业区段两侧临时接地 ( $3 \text{ kV}$ 及以上线路)	应符合 $R \leq 50/I$ 应符合 $R \leq 100/I$ 每相最好不大于 $5 \Omega$ , 最大不应超过 $10 \Omega$	低压电网 ( $1 \text{ kV}$ 以下) 禁止使用大地作导线或零线
	一般建筑物	建筑物上的避雷针、避雷带和避雷线 独立的或沿树干、旗杆等装设的避雷针及避雷线	不大于 $20 \sim 30$	
	人员密集、公共建筑物	建筑物上的避雷针、避雷带和避雷线 独立的或沿树干、旗杆等装设的避雷针及避雷线	不大于 10	
	有易燃易爆物的建筑物、构筑物	防护直击雷、感应雷的接地与电气设备保护接地连在一起	不应大于 10	
		低压线和通信线的引入线绝缘子铁脚接地、保护电缆段的阀式避雷器的接地及电缆外皮的接地连在一起	不应大于 10	
		30 雷暴日以下地区, 低压线、通信线直接引入时: 进户处阀式避雷器或保护间隙的接地与进户线绝缘子铁脚接地和电气设备的保护接地连在一起	不应大于 5	
		靠近建筑物第 1 根电杆绝缘子铁脚的接地	不应大于 10	
		靠近建筑物的第 2、3 根电杆绝缘子铁脚的接地	不应大于 20	
		架空和埋入地下的金属管道、电缆等距建筑物约 $25 \text{ m}$ 处的接地	不应大于 10	

参考书目

解广润主编. 电力系统过电压. 北京: 水利电力出版社, 1988

(解广润)

pedi dianzu celiang

接地电阻测量 (earthing resistance measurement)

在测量接地装置的接地电阻时, 要打一个电流极入地, 使电流由被测接地装置及电流极形成

回路；再打一个电压极入地，以便测量接地装置的电位。电流极引线及电压极引线应相距 10 m 以上，以减少二者之间互感的影响。电流极引线及电压极引线分别独立接在被测接地装置的两点上，以消除连接点接触电阻对测量结果的影响。测量可使用交流电源及电流表-电压表法（见图 1），当干扰不大时也可使用接地摇表测量。

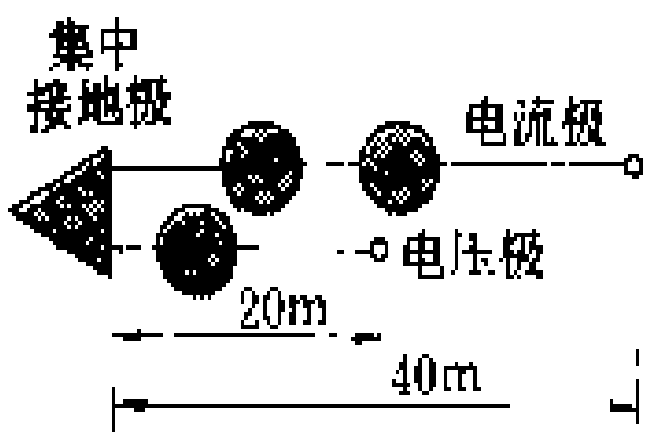


图 1 集中接地极接地电阻的测量接线

接地电阻应是由接地装置到无穷远处零电位面之间的土壤电阻。由于在测量时电流极的存在，在被测接地装置与电流极之间的中央地带形成了一个零电位面，当电流极与电压极相距很近时，会使测量结果产生较大误差。为减小或消除这一误差，在电流极和电压极的布置上可以采用远离法和补偿法。

用远离法测接地电阻时，应将电流极打在离被测接地装置 (5~10)  $D$  以外， $D$  为被测接地装置的最大尺寸（如最大对角线长度或垂直长接地极的长度），并将电压极打在电流极与被测接地装置之间的中央位置上，或打在与电流极相反方向离开接地装置 (5~10)  $D$  以外的位置上。

用补偿法测接地电阻时，可将电流极到被测接地装置之间的距离  $d_{13}$ （见图 2）适当减小（例如减小到  $2D$ ），而将电压极打在距接地装置为  $d_{12} = 0.618d_{13}$  的位置上（见图 2），这一布置可补偿掉被测接地装置与电流极间存在零电位面而造成的误差。

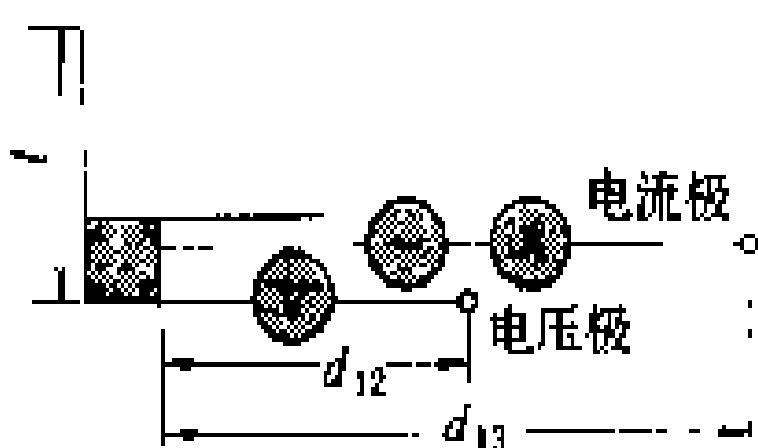


图 2 线路杆塔接地电阻的测量接线

集中接地极接地电阻的测量 测量接线见图 1。电流极和电压极距被测接地极边缘分别为 40 m 及 20 m。

电力线路杆塔接地电阻的测量 电极的布置见图 2。

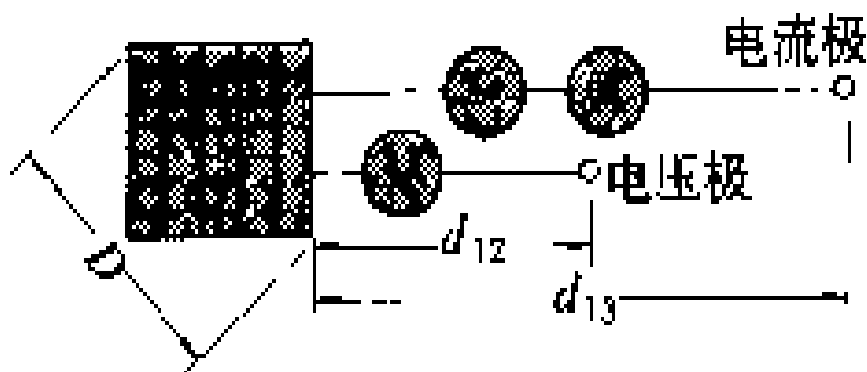


图 3 发电厂、变电所地网接地电阻的测量接线（直线法）

$d_{13}$  一般取为接地装置最长射线长度  $l$  的 4 倍， $d_{12}$  取为  $l$  的 2.5 倍。测量时，接地装置应与避雷线断开。电流极、电压极应布置在与线路或地下金属管道垂直的方向上。不要在雨雪后马上测量杆塔的接地电阻。

发电厂、变电所接地网接地电阻的测量 电极的

布置见图 3。电流极与地网边缘之间的距离  $d_{13}$ ，一般取为地网最大对角线长度  $D$  的 4~5 倍，以使其间的电位分布出现一平缓区段。在一般情况下，电压极到地网的距离  $d_{12}$  约为  $0.5d_{13}$ 。测量时，电压极沿电流极与地网的连线方向移动三次，每次移动距离为  $d_{12}$  的 5% 左右，直至三次测得的电阻值相近即可。如  $d_{13}$  取 (4~

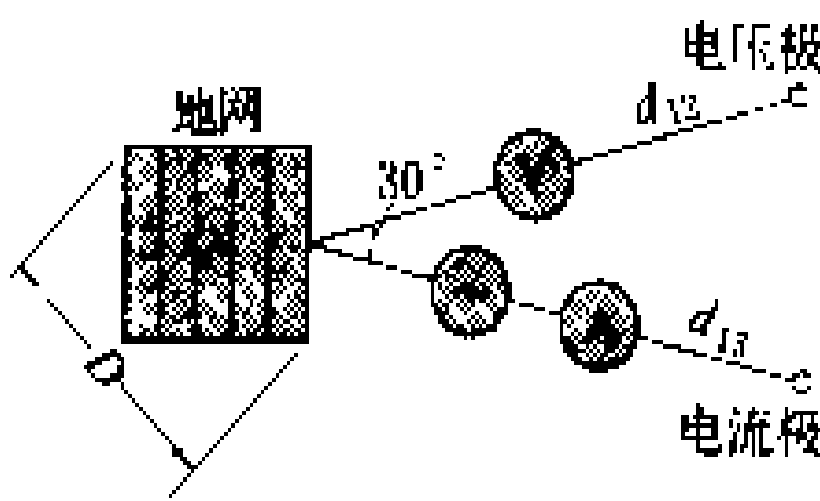


图 4 发电厂、变电所地网接地电阻的测量接线（夹角法）

5)  $D$  有困难，在土壤电阻率较均匀的地区， $d_{13}$  可减小到  $2D$ ，而  $d_{12}$  取为  $D$ ；在土壤电阻率不均匀的地区或城区， $d_{13}$  可取为  $3D$ ， $d_{12}$  取为  $1.7D$ 。

电流极和电压极的布置也可采用图 4 的方式（夹角法），一般取  $d_{12} = d_{13} \geq 2D$ ，夹角  $\theta = 30^\circ$ 。

接地电阻测量中对季节影响的考虑 不同季节土壤的含水量不同，接地装置的接地电阻是随季节不同而变化的。一年中某一天测得的接地电阻不一定有代表性，例如雨后不久测得的电阻偏小，而久旱后测得的电阻偏大。因此，测量接地电阻应在无雨水时进行，并考虑到干旱的情况，对于防雷接地装置，是将测得值再乘以季节系数  $\psi$ ，其值见表。在测量时，如土壤比较干燥，用表中的较小值；如土壤比较潮湿，则应采用表中的较大值。

接地装置的季节系数

接地装置长度 (m)	季节系数 $\psi$	
	水平接地体	2~3m 的垂直接地体
0.5	1.4~1.8	1.2~1.4
1.8~1.0	1.25~1.45	1.15~1.3
2.5~3.0	1.0~1.1	1.0~1.1

参考书目

Tagg G F. Earth Resistances. White Friars Press Ltd., 1964

解广润主编，电力系统过电压，北京：水利电力出版社，1991

（解广润）

jiedi zhuangzhi

**接地装置** (earthing device) 接地体和接地线的总称。接地体指埋入地中并直接与大地接触的金属导体，也称接地极，包括各种金属构件、金属井管、钢筋混凝土建筑物的基础等自然接地体。接地线指将电力设备或杆塔与接地体连接用的金属导体，也称接地引下线。接地装置应有足够低的接地电阻和较强的

防腐能力，在通过雷电流或工频短路电流时应具有足够的热稳定性，雷电流或工频短路电流在接地装置上形成的压降和跨步电动势、接触电动势不应危及设备或人身的安全。

接地体 交流电力设备的接地装置应充分利用直接埋入地中或水中的自然接地体。在敷设人工接地体时可采取水平和垂直两种方式。水平敷设时采用圆钢、扁钢或铜条，垂直敷设时采用角钢、圆钢或铜棒。从腐蚀寿命考虑，钢接地体的截面不应小于表 1 中所列数值。在腐蚀性较强场所的钢接地体应采取热镀锌或热镀锌等防腐措施或适当增大截面。

表 1 钢接地体和接地线的最小规格

材 质	最小规格	埋 入 地 下		
		屋 内	屋 外	地 下
圆钢	直径 (mm)	5	6	8
扁钢	截面 (mm <sup>2</sup> )	24	48	48
	厚度 (mm)	3	4	4
角钢	厚度 (mm)	2	2.5	4
钢管	管壁厚度 (mm)	2.5	2.5	3.5

注：电力线路杆塔的接地体引出线，其截面不应小于 50 mm<sup>2</sup>，并应热镀锌。

土壤电阻率较低地区的线路接地体通常采用单根水平接地体或水平接地体与垂直接地体的组合。高土壤电阻率地区的线路接地体常采用多根射线型的水平接地体。在土壤电阻率特别高时，可采用连续地线。

发电厂、变电所的接地装置采用以水平接地体为主的网格形接地体（见交流地网）。

直流感地体除埋入地中外，也可置于海水中。直流接地装置的接地体采用包在焦炭粉中的低碳钢、石墨和铜（只用作阴极）作材料。接地体在水平敷设时采用圆环形、直线形或放射形，也可垂直敷设（见直流输电接地电极）。

交流接地体的埋设深度一般为 0.6~0.8 m。直流接地体的埋设深度一般为 1.5~2 m。

接地线 接地线一般采用钢质导体。从防腐蚀方面考虑，钢接地线的截面不应小于表 1 中所列的数值。

大接地短路电流系统中接地线的截面，在按接地短路电流进行热稳定校验时，钢接地线的短时温度不应超过 400℃，铜接地线不应超过 450℃。小接地短路电流系统中，接地线的截面，应保证在考虑系统 5~10 年发展后，接地线流过接地短路电流时，对敷设在地上的接地线要求其长时间温度不超过 150℃，对敷设在地下的接地线要求不超过 100℃。

移动式电气设备的接地线和三相四线制的照明电缆，以及用钢接地线在结构上有困难时，可用铜或铝接

地线。低压电气设备的铜、铝接地线的最小截面见表 2。

表 2 低压电气设备铜或铝接地线的最小截面

接地线类型	铜 (mm <sup>2</sup> )	铝 (mm <sup>2</sup> )
明设的裸导体	4	6
绝缘线	1.5	2.5
电缆的接地芯线或与相线包在同一保护外壳内的多芯导线的接地芯线	1	1.5

注：因为裸铝导体很容易被腐蚀，所以一般不用作地下的接地线。

携带式电气设备的接地线一般用多股软铜线。检修等临时接地用的携带式接地线也不能使用钢材，应采用裸铜软绞线。这两种接地线的最小截面见表 3。

交流电力设备的接地线应尽量利用金属构件、普通钢筋混凝土构件的钢筋、穿线的钢管和电缆的铅、铝外皮等。低压电力设备的接地线可利用金属管道。在利用以上设施作接地线时，应保证其全长为完好的电气通路。如果利用串联的金属构件作为接地线时，金属构件之间应以截面不小于 100 mm<sup>2</sup> 的钢材焊接。

表 3 携带式接地线和携带式电气设备接地线的最小截面

接地线种类	携带式接地线 (裸铜软绞线总截面)	携带式电气设备的 接 地 线 (多股软铜线总截面)
最小截面 (mm <sup>2</sup> )	2.5	1.5

不得使用蛇皮管、易燃易爆的液体或气体管道、保温管的金属网或外皮，以及低压照明网络的电缆铅皮作接地线。

直流接地装置进入地中的接地线要采用电缆。  
(解广润)

jiehuxian yu jinhuxian

接户线与进户线 (service mains and service tails)

供电线路与用户受电设备间的连接线。其中从供电线路至供电部门与用户供用电设备责任分界点的一段为供电部门所有，称接户线；从责任分界点至用户受电设备间(量电设备)的一段为用户所有，称进户线。接户线与进户线在责任分界点连接。

责任分界 低压架空线供电的用户，电业与用户的责任分界点为用户墙外第一支持物（如墙装铁横担等）。低压电缆供电的用户，责任分界点在电缆终端头尾线与用户电线连接处。高压架空线供电的用户，若

用户变电所为屋内装置时,责任分界点为变电所外墙穿墙套管;若用户变电所为屋外装置时,责任分界点在用户第一高压设备连接处。高压电缆供电的用户,责任分界点在电缆终端头尾线与用户第一高压设备连接处。

**导线技术要求** 高压架空线供电的接户线及进户线大多用裸绞线;低压架空线供电时,一般用橡胶绝缘线或塑料绝缘线,并视实际情况采用铜或铝导线,但进户线的线材应尽量与接户线的线材相同。导线截面应按导线安全载流量选择。为满足一定的机械强度,根据中国国家标准 GBJ54《低压配电装置及线路设计规范》的规定,低压进户线的铜芯绝缘线最小截面为  $1.5\text{ mm}^2$ ,铝芯绝缘线最小截面为  $2.5\text{ mm}^2$ 。接户线及进户线装设时的对地高度和安全距离,均要满足当地电力管理部门的规定。

(金辅夏)

jiebo chongji jueyuan shuiping

**截波冲击绝缘水平** (chopped wave impulse insulation level) 电气设备在标准截波 ( $1.2/2\text{ }\mu\text{s}$ ) 冲击电压作用下耐受电压的能力,用规定的雷电冲击截波耐受电压(或截波冲击耐受电压)表示。截波的产生是由于变电所的外绝缘闪络,以及雷击进线段导线闪络时,侵入变电所的雷电波陡度较大,此时变压器上的电压波形具有明显的高频振荡,相当于受到截波的作用。

在中国,根据运行经验和经济比较,电气设备的截波冲击耐受电压分内绝缘和外绝缘两方面分别确定。

(1) 内绝缘雷电冲击截波耐受电压为

$$U_i = 1.25 \times 1.15(1.1U_s + 15), \text{ kV}$$

式中  $1.15$  为累积系数; $1.25$  为截波系数; $U_s$  为避雷器在  $5\text{ kA}$  时的残压;系数  $1.1$  是考虑避雷器与变压器间的振荡而使变压器上的电压有所升高以及来波波头小于避雷器残压试验用的  $10\text{ }\mu\text{s}$  波头而引起的电压升高而增加的系数;括号内的  $15$  是考虑避雷器连线及接地电阻上的压降而增加的数值。

(2) 外绝缘雷电冲击截波耐受电压为

$$U_o = \frac{1.25(1.1U_s + 15)}{0.84}, \text{ kV}$$

外绝缘可不计累积效应,但要考虑大气条件的影响,对海拔  $1000\text{ m}$  及以下地区的电气设备,取空气密度和湿度的综合修正系数为  $0.84$ 。

(3) 确定  $330\sim 500\text{ kV}$  变压器类电气设备的截波冲击绝缘水平时,上述公式中的  $U_s$  改用  $U_{10}$ ,即以避雷器  $10\text{ kA}$  残压为基础进行计算。

中国国家标准 GB311.1《高压输变电设备的绝缘配合》中的第 3.5 条和第 3.6 条规定了不同电压等级的电气设备的冲击截波耐受电压值。

(方 瑜)

jiebo zhuangzhi

**截波装置** (chopping device) 与冲击电压发生器联合使用使冲击电压波在某一时刻突然骤降至零而形成冲击截波的一种高电压装置。用它产生的截波对带有绕组的高压电气设备(如电力变压器、电抗器等)进行试验,可以在电气设备绕组匝间产生较高的电位差,以考核绕组的匝间绝缘。

最简单的截波装置是一对球隙或棒间隙,它并联在冲击电压发生器和被试品之间。当冲击电压达到某一数值时,并联间隙击穿,在被试品上得到一个冲击截波。截波的截断电压随间隙大小而变,一旦间隙距离调定,截断电压及截断时间随之而定。这种简单的单间隙截波装置适用于中、低压电气设备的试验。近几年发展起来的可控触发的多间隙截波装置,是以多间隙代替单间隙,并在每对间隙上设置了触发电极和并联了均压电阻或电容,与第一级间隙的触发电极相连接的触发单元,可以控制触发时间,使得冲击波可按不同要求在波前、波峰或波尾处被截断。多间隙截波装置的优点有:①截断时间是可控的;②装置的横向尺寸小,可节省试验室的占地面积;③有利于向更高电压等级发展(瑞士 Heafely 公司已经有了  $3.6\text{ MV}$  的产品);④均压电容器或电阻可设计成一个分压器,用于测量全波或在波尾处被截断的截波峰值。

截波装置还可以和工频、直流电压发生器联合使用,以产生工频截波电压和直流截波电压。

(王 来)

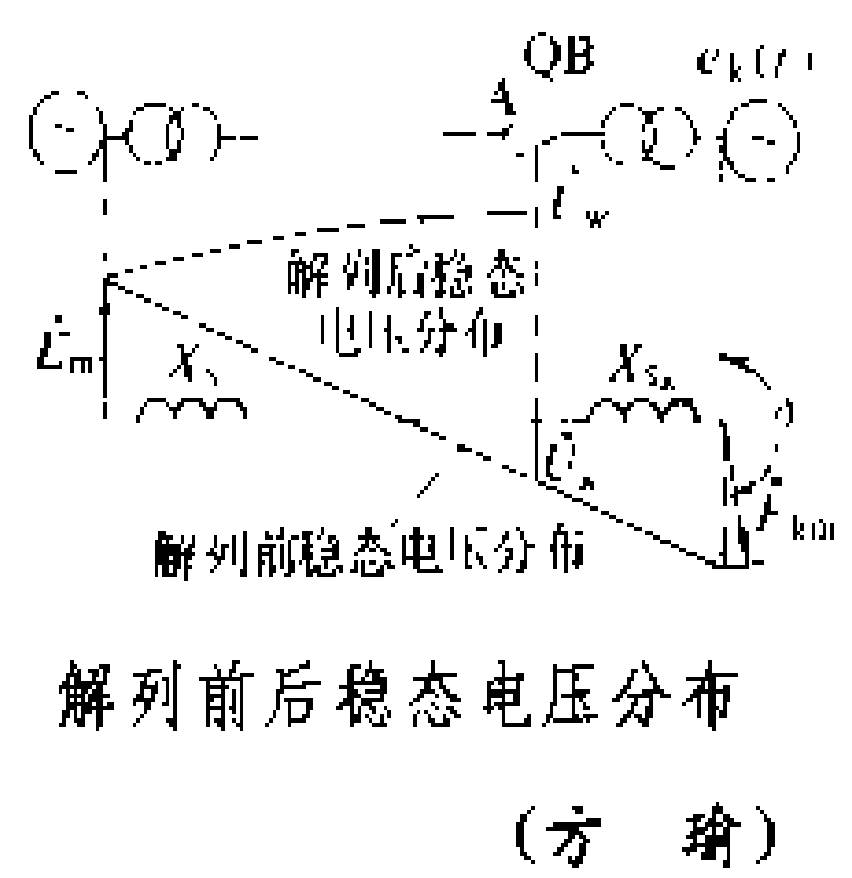
jielie guodianya

**解列过电压** (overvoltage due to system splitting) 多电源系统中因系统解列导致暂态振荡所引起的过渡过程过电压。它是操作过电压的一种。

在图示的多电源系统中,若因异步运行或非对称短路等原因,促使某线路两端电源电动势的功角差  $\delta$  接近  $180^\circ$  时断路器 QB 跳闸,系统解列。此时, QB 的线路侧 A 点的电压要从解列前的稳态电压  $U_k$  过渡至解列后的稳态电压  $U_w$ ,从而会出现围绕  $U_w$  振荡的解列过电压。解列过电压的振幅,由  $U_w$  与  $U_k$  的差值决定,它主要与解列时线路两端电动势的功角差  $\delta$ 、线路长度、解列点位置、解列后带空载线路的电源容量(电源等值漏抗  $X_\Sigma$  值)以及线路是否存在单相接地故障等因素有关。实际运行中,上述诸因素最不利情况同时

出现的概率是很小的。

解列过电压可用断路器分闸并联电阻来限制，也可用性能良好的阀式避雷器来限制。此外，还可采用自动装置控制解列操作在一定范围的功角差之内完成，从而在根本上限制解列过电压。



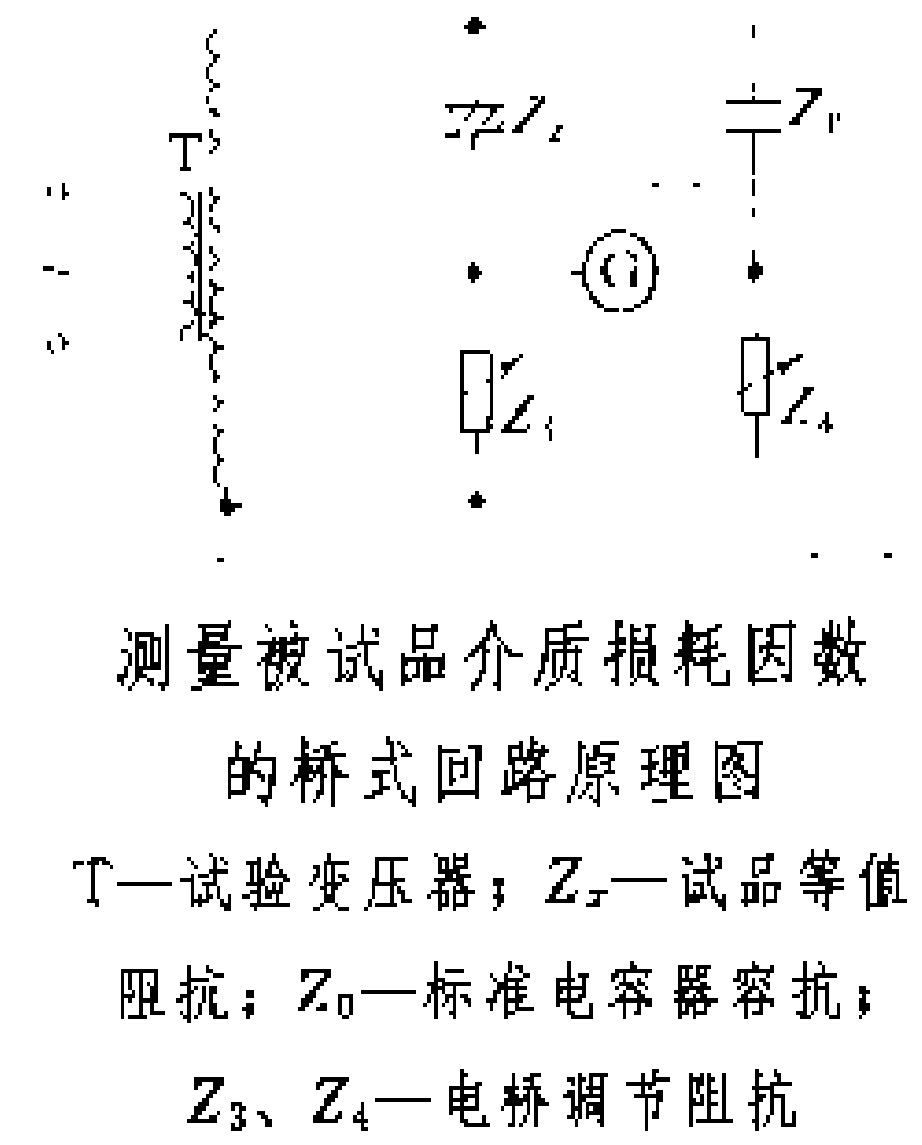
(方 瑜)

jiezhi sunhao yinshu celiang

介质损耗因数测量 (dielectric dissipation factor measurement; tgδ measurement)

测定介质在交流电压作用下的有功损耗和相应介电特性的试验。介质损耗因数 (tgδ) 是指流过绝缘介质的有功电流与无功电流之比值，它是反映介质绝缘性能的重要指标。该项试验广泛用于产品的质量检验和绝缘试样的研究试验，作为判断设备绝缘性能及选择材料、控制加工工艺的一种依据。

测量方法主要有电桥法和数字化测量法。电桥法中，使用最普遍的是平衡电桥法（如西林电桥），少数现场也使用便携式不平衡电桥（如 M 型试验器）。



平衡电桥法的工作原理见图。被试品 ( $Z_x$ ) 和标准电容器 ( $Z_0$ ) 分别为两个桥臂，另外两个可调臂  $Z_3$  和  $Z_4$  设置在电桥中。除了对介质的高频特性有要求外，一般均在工频电压下测量。 $Z_3$  和  $Z_4$  可由电阻、电容或电感元件

组成，由此形成三种不同特点的电桥。西林电桥的桥臂  $Z_3$  为可变电阻  $R_3$ ，桥臂  $Z_4$  为固定电阻  $R_4$  与可变电容  $C_4$  相并联。当电桥平衡时，流经检流计  $G$  的电流为零，可由  $Z_x = Z_0 \cdot Z_3 / Z_4$  的关系式推算得  $\text{tg}\delta = \omega C_4 R_4$ 。设计西林电桥时可适当选择  $R_4$  值，即可由  $C_4$  的标值直接读出  $\text{tg}\delta$  值。为减少干扰的影响和提高测试精度，有些西林电桥内设有防护反电动势和附加平衡电容的调节。根据被试品接地情况，桥路的连接可用正接法（如图所示，电桥处于低电位），用于测量不直接接地的被试品，也可用反接法（电桥处于高电位）和对角线接法用于测量有一端直接接地的被试品。低压工频电桥（四电容电桥）的桥臂  $Z_3$  和  $Z_4$  均有电容，

可较精确地测量  $\text{tg}\delta$  很小的绝缘材料。电流比较电桥的桥臂  $Z_3$  和  $Z_4$  都由感性元件组成，一般用作更精密的、量程范围较大的校正测量。

数字化测量法是近年来开发的新方法，其基本原理是将流过被试品的电流信号和由高压标准电容器获取的电压信号用相位比较器进行比较，利用脉冲计数法测出相位差，再计算出介质损失角  $\delta$ 。用数字化测量法测试，可避免电桥调节平衡的复杂过程，用于在线设备的连续监测十分有利。

参考书目

刘耀南，邱昌容．电气绝缘测试技术．北京：机械工业出版社，1981

(凌 悠)

jinsu yanghuawu bileiqi

金属氧化物避雷器 (metal oxide surge arrester, MOA)

由金属氧化物阀片组成的阀式避雷器，也称氧化锌避雷器。金属氧化物避雷器的保护性能优于普通阀式避雷器和磁吹避雷器，其雷电冲击和操作冲击的保护比分别为 1.5 和 1.3。

金属氧化物阀片是以氧化锌为主要成分，加入少量的铋、钴、铬、锰、锑等金属氧化物作为添加剂，经过混料、造粒、成型，在 1000℃ 以上的高温下烧结而成的，形状呈圆饼形或环形。

金属氧化物阀片具有优异的非线性特性，其非线性系数  $\alpha$  可高达 0.01~0.04。当作用在阀片上的电压是避雷器的正常工作电压时，流过阀片的只是微安级的泄漏电流，所以金属氧化物避雷器一般可不设串联间隙。由于没有串联间隙，金属氧化物避雷器对过电压响应快，便于和六氟化硫气体绝缘电器和其他伏秒特性平坦的电器的绝缘特性相配合。

金属氧化物阀片具有很大的通流能力，而且可以用多柱阀片并联的方式来提高通流能力，所以金属氧化物避雷器可以吸收很大的操作过电压能量。

非线性电阻伏安特性拐点附近的某一电流值称为金属氧化物避雷器的参考电流。该值与阀片的材料和尺寸有关，一般出现在 1~20 mA 之间。在参考电流下测得的避雷器上的电压称为避雷器的参考电压。当作用在避雷器上的电压超过其参考电压时，流过阀片的电流将迅速增大。

无间隙金属氧化物避雷器在运行中将长期受工频电压的作用。在运行中允许持久地施加在避雷器上的工频电压（有效值）称为避雷器的持续运行电压。避雷器的最大持续运行电压峰值与其参考电压之比称为避雷器的荷电率。性能良好的金属氧化物阀片的荷电率可达 90%。金属氧化物避雷器的荷电率一般设计



在 50%~80% 的范围内。过高的荷电率将降低避雷器的寿命。

为减少金属氧化物避雷器的荷电率，又不增大其残压，可以在部分阀片上并联放电间隙。当残压上升到一定值后，并联间隙放电将阀片短接，从而阻止了残压的进一步升高。这种避雷器称为带并联间隙的金属氧化物避雷器。

在中性点非有效接地系统中，由于单相接地运行的时间可能很长，加上可能遇到弧光接地过电压的持续作用，要求金属氧化物避雷器有较高的荷电率和较大的释放能量的能力。为解决这一困难，可以加设串联间隙组成有串联间隙的金属氧化物避雷器。

20 世纪 60 年代末，日本松下电器公司首先研制成金属氧化物电阻，用以保护电子设备和作稳压用，70 年代又研制出保护电力设备的氧化锌避雷器。之后，美国和西欧的制造厂相继进行了研制。在日本和美国等国家，金属氧化物避雷器已逐步取代了碳化硅阀片的普通阀式避雷器和磁吹避雷器。苏联等国在改进金属氧化物避雷器的性能和扩大其应用范围等方面都正在积极进行研究。

参考书目

机械工程手册 电机工程手册编辑委员会，电机工程手册，第 28 篇 避雷器，北京：机械工业出版社，1978

(李启盛)

jincouxing shudian xianlu

紧凑型输电线路 (compact transmission line)

导线排列与杆塔几何尺寸（主要是杆塔宽度）比常规线路小的高压输电线路。研究建设紧凑型输电线路的目的是节约线路走廊的占地面积，同时也可以提高线路的自然功率。在超高压长线路上，以增加分裂导线的子导线根数，加大分裂间距，缩短相间距离，从而降低线路的波阻抗，提高自然功率的紧凑型线路，又称高自然功率线路。

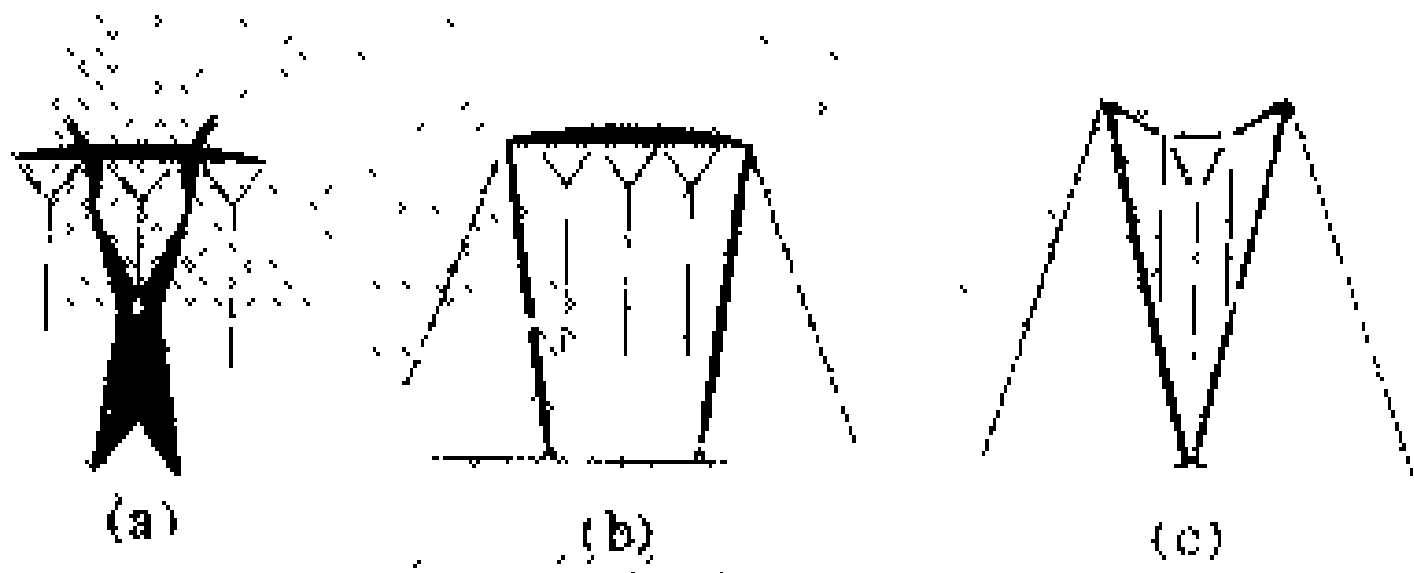


图 1 紧凑型输电线路杆塔示意图

(a) V 形绝缘子串；(b) 相间无立柱；(c) 悬索结构

一般紧凑型输电线路采取的技术措施是：①采用 V 形绝缘子串减小导线摆动幅度[见图 1(a)]；②取消相间立柱，缩短相导线之间的距离[见图 1(b)]；③采

用悬索结构，使三相导线呈倒三角形排列，既缩小了线路宽度，又能节约钢材，减少基建投资 [见图 1(c)]。

高自然功率线路除了能使自然功率有较大幅度地提高外，同时还通过优化导线的排列方式，使三相导线之间及每相各子导线之间表面电荷分布均匀，充分利用导线截面，达到节约导线的目的。这种线路既压缩了线路走廊宽度，又较大幅度地提高了自然功率，因此有较好的技术经济效果。

一般紧凑型线路的研究与建设是从 20 世纪 60 年代开始的。在近 30 年里已经在美国、意大利、法国、加拿大、日本、德国及苏联等国家，先后建设了紧凑型输电线路。中国也根据具体条件在新建的及升压改造的线路工程中采用了线路紧凑型化的部分措施。紧凑型输电线路虽然首先是从节约线路走廊占地、缩小线路宽度出发的，但其实践的结果，由于相间距离缩短，必然会使相间电容量增大、电感量减小，从而使波阻抗降低，自然功率可以增大 20%~30%。

高自然功率线路的思路是 20 世纪 70 年代开始由苏联列宁格勒工学院 Г. Н. 阿历克山大罗夫 (Г. Н. Александров) 教授等人首先提出的。根据这种思路，苏联能源部科学技术委员会于 1984 年讨论并支持兴建一条 330 kV 紧凑型的工业性试验线路。该线路从普斯科夫斯卡娅水电站到诺沃索科尔尼卡，线路全长 145.2 km，采用  $4 \times 150 \text{ mm}^2$  四分裂导线，三相水平排列；中相子导线布置于椭圆形轨迹上，边相子导线为半椭圆形布置；相间距离 5.5 m；中相子导线上层与下层距离为 1 m (杆塔处) 至 1.6 m (档距中央)，边相上下层子导线间距为 1.6~1.7 m (杆塔处) 至 2.6 m (档距中央)。该线路的设计自然功率为 605 MW，为常规线路 360 MW 的 1.68 倍。见图 2。

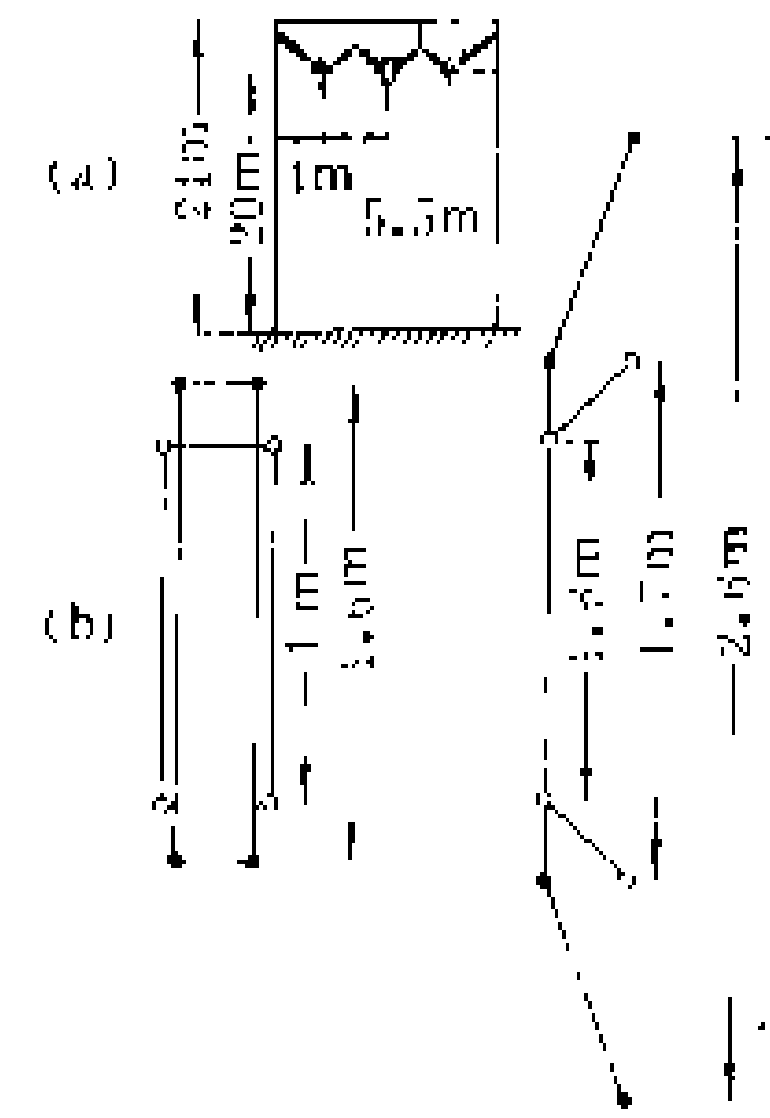


图 2 苏联 330 kV 紧凑型输电线路

对于高自然功率线路，无论在苏联还是在国际上，都有争议。对从理论上说可以提高自然功率并无异议，但是由于线路结构及所需金具复杂，为了缩短相间距离还不得不采用价格比较贵的合成绝缘子与间隔棒，而它的运行老化问题尚待考验。此外，还由于高自然功率线路电容大面引起了充电功率的补偿问题。雷击跳闸率也有可能增大，带电作业技术还有待研究。因此，一方面，加拿大、美国、印度和德国都购买了苏联的专利；

另一方面,这种线路的兴建并不很多。中国已经决定并正在进行两条 220 kV 高自然功率线路的试点建设,希望积累经验,为进一步采用取得一些实践资料。

高自然功率线路是提高线路输电能力的新措施。是否采用仍决定于电力网的需要并受电力网的制约。在选定方案时,还要与采用双回线、提高电压等级、多相输电等各种方案进行技术经济比较后才能作出决定。

参考书目

Barbaribo M. etc. Compact Versus Conventional EHV Lines. In: Technical and Economical Comparisons, paper No. 22-13, 1984 Session, CIGRE

Александров Г. Н. Новые средства передачи электроэнергии в электроэнергетических системах. Ленинград: Издательство ленинградского университета, 1987

(徐士珩)

jingji shusong rongliang

**经济输送容量** (economical capacity of power transmission) 见输电容量。

jingzhaguanfa fuzhu dianlu

**晶闸管阀辅助电路** (auxiliary circuit of thyristor valve) 除了阀元件构成的主电路及其触发电路之外,装在晶闸管阀内部用于保护、监测和储能的其它电路。包括均压电路、阻尼电路、储能电路、保护性触发电路、监控电路等。

**均压电路** 用以改善因阀内各晶闸管元件特性的量值有一定散度而造成的阀元件串电压分布不均匀。按作用不同可分为:稳态均压、关断动态均压、开通动态均压和陡波均压四种。

**稳态均压** 使正常阻断状态时各晶闸管元件电压分布比较均匀,不致发生过电压而损坏元件。串联的晶闸管元件间电压分布与元件的漏电流大小有关,元件漏电流与漏电流平均值差别越多,则电压分布越不均匀。稳态均压措施是在各元件的阴阳极两端并联阻值相同的电阻  $R_1$  [见图 1 (b)],其电阻值远小于元件阻断状态的电阻值,从而使各元件的电压分布趋于均匀。

**关断动态均压** 阀在关断过程中当电流下降到零时,各元件中尚有剩余载流子存在。由于后继反向电压的作用,在一个很短的时间内将有相当大的反向恢复电流存在。只有当剩余载流子消失,反向电流下降到反向漏电流,并经一段时间后,元件才能恢复阻断能力。电流从正向减少到零至阻断能力恢复时止的时间称为关断时间。剩余载流子少的元件关断得早,其

结电容也将最早被反向充电。元件剩余载流子不同,阴阳极间电容充电的电荷量也不同,因而电容值很小的元件其极间反向电压值也就很大。为改善这种电压分布的不均匀,可在每个元件两端并联较大的电容,以达到均压的目的。一般采用在每个元件阴阳极两端并联  $R_1-C_1$  电路的方法,如图 1 (b) 所示。只要选择适当的电容值,就可使元件电压差异控制在不超过 10% 的范围内。

**开通动态均压** 从晶闸管元件控制极加上触发脉冲达到幅值的 10% 时到元件电流达到最终幅值的 90% 或电压下降到初值的 10% 为止的时间称为开通时间。同一阀串中各元件的开通时间难免有差别,并且其长短与触发电流的大小也有关。触发电流越小,则开通时间越长,各元件开通时间的差别也越大。因此,采用强触发方式加大触发电流,则能改善开通时的动态均压。由于同一桥臂上各元件开通特性有差异,换流阀被触发后,当大部分元件已先开通时,桥臂两端电压将加在小部分迟开通元件上,使这小部分元件遭受过电压。改善办法是:实行强触发,在许可范围内增大触发电流,以减少元件间开通时间的差异。另一方面在元件旁并联电阻  $R_1-C_1$  电路,并在阀组件中串联电感  $L$  (也称阀电抗器),见图 1 (b)。电阻  $R_1$  用来限制电容  $C_1$  中的电荷经由导通元件的放电。串联电感  $L$  用来承受一部分正在变化中的阀电压,减小加到元件上的电压,并改善元件和组件的电压分布。

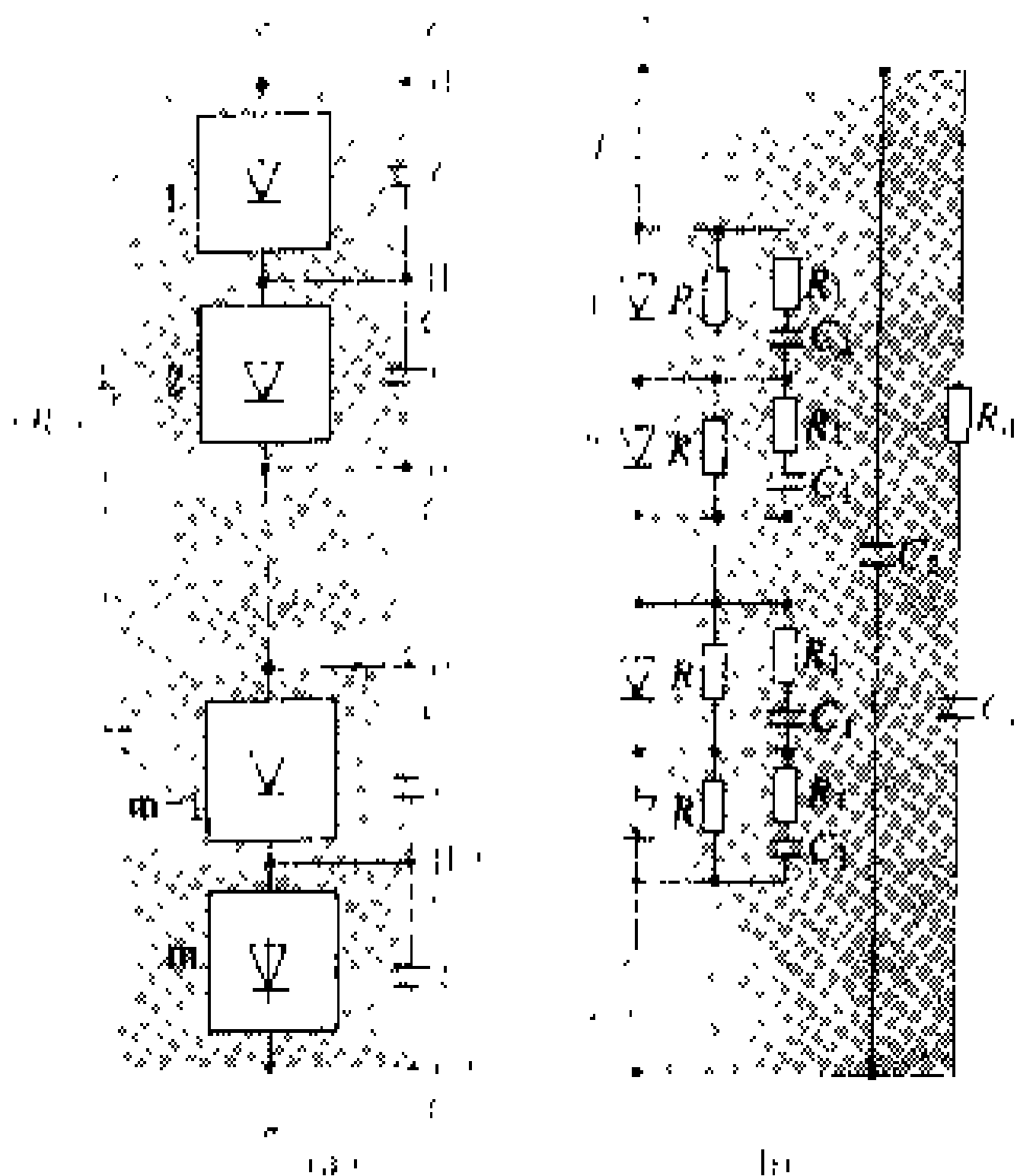


图 1 阀均压阻尼电路

(a) 由  $m$  个组件串联组成的阀; (b) 阀组件及其均压电路

**陡波均压** 为了便于组装和检修,通常将一个桥臂的全部元件分成若干组,构成组件。各组件之间存在着对地杂散电容  $C_g$  的差异,这种差异会导致各组件间电压分配不均匀,尤其当陡的过电压波作用时更

是如此，愈接近加电压端的组件分配到的电压愈大。如果在组件之间加装大的均压电容，如图 1 中的  $C_2$ ，可以减少组件间电压分布不均匀。如果随着阀组件与接地构件间的电位差的增高将  $C_2$  逐级加大，就能得到更好的组件均压效果，但电容器备品规格增多。

**阻尼电路** 由于阀的阴、阳极间存在微小的杂散电容，与电路中的杂散电感等参数配合在一起，在阀的开通与关断时会引起相应的电流振荡与电压振荡。这种振荡的频率通常从数千赫到数十千赫，引起的电压振荡过冲值接近于 100%，电流上升变化率将达每微秒数百安培。阻尼电路就是为了将这种振荡的峰值和变化率限制在允许范围之内。

**电压振荡的阻尼** 电压振荡由阀关断时产生一个较大的跳变电压所诱发，通常在阀组件旁并联一个 RC 串联而成的并联支路阻尼这种振荡。当阻尼电路和阀的均压回路合并考虑连同组件装在阀内部时称为内阻尼，如图 1 (b) 中的  $R_d$  和  $C_d$ 。早期，特别是采用汞弧阀时，阻尼电路单独设置在阀体外部，称为外阻尼，如图 1 (a) 中的  $R_d$  和  $C_d$ 。采用阻尼器后可将振荡过冲值限制在 25%~30% 左右。

**电流振荡的阻尼** 阀在开通时，其极间电容、杂散电容以及设备中装设的并联电容等在阀未开通之前所充的电荷通过开通的元件放电，从而形成电流振荡。电流振荡可能使直流电流间断而导致过电压，也可能造成阀电流上升率过大而损坏元件，高频带的电流振荡波还会产生无线电干扰。为阻尼电流振荡，通常在阀主电路内串联阀电抗器，可降低电流的振荡频率和幅值。

综合的均压-阻尼电路如图 1 所示，其中  $R$  用作稳态均压， $C_1$  用以关断动态均压， $R_1$  限制  $C_1$  的放电电流， $C_2$  用于组件间的陡波均压， $C_d$  和  $R_d$  以阻尼电压振荡为主，对陡度比较平缓的操作过电压也能改善组件电压分布， $L$  有利于开通时动态均压并阻尼电流振荡和分担一部分陡波过电压。

随着单个晶闸管元件容量的迅速增大，发展的趋势是：以一个元件为一级，每级都串联有一个阀电抗器和并联有电阻、电容以及二极管构成的均压阻尼电路。

**储能电路** 阀的触发脉冲应施加于各晶闸管元件的控制极，阀串中各元件的控制极对地电位差很大，而且各不相同，所以接近于地电位的控制装置产生的控制信号，通过光-电或电-磁耦合方式传递至由储能电路供电的阀触发脉冲形成电路，从而解决上述大电位差的绝缘和电平配合问题。

储能的基本电路如图 2 所示。当阀的晶闸管元件

V 的 A、K 两点间承受正向阻断电压时，通过阻尼电路 D 和二极管 V1 向储能电容 C 充电，当电压  $U_{CK}$  到达稳压管 V2 的击穿电压时，小 V3 导通，阻尼电路直接至主晶闸管元件两端，但因有二极管 V1 的阻隔作用，储能电容已获得的电能可以有效地提供给触发脉冲形成电路使用。

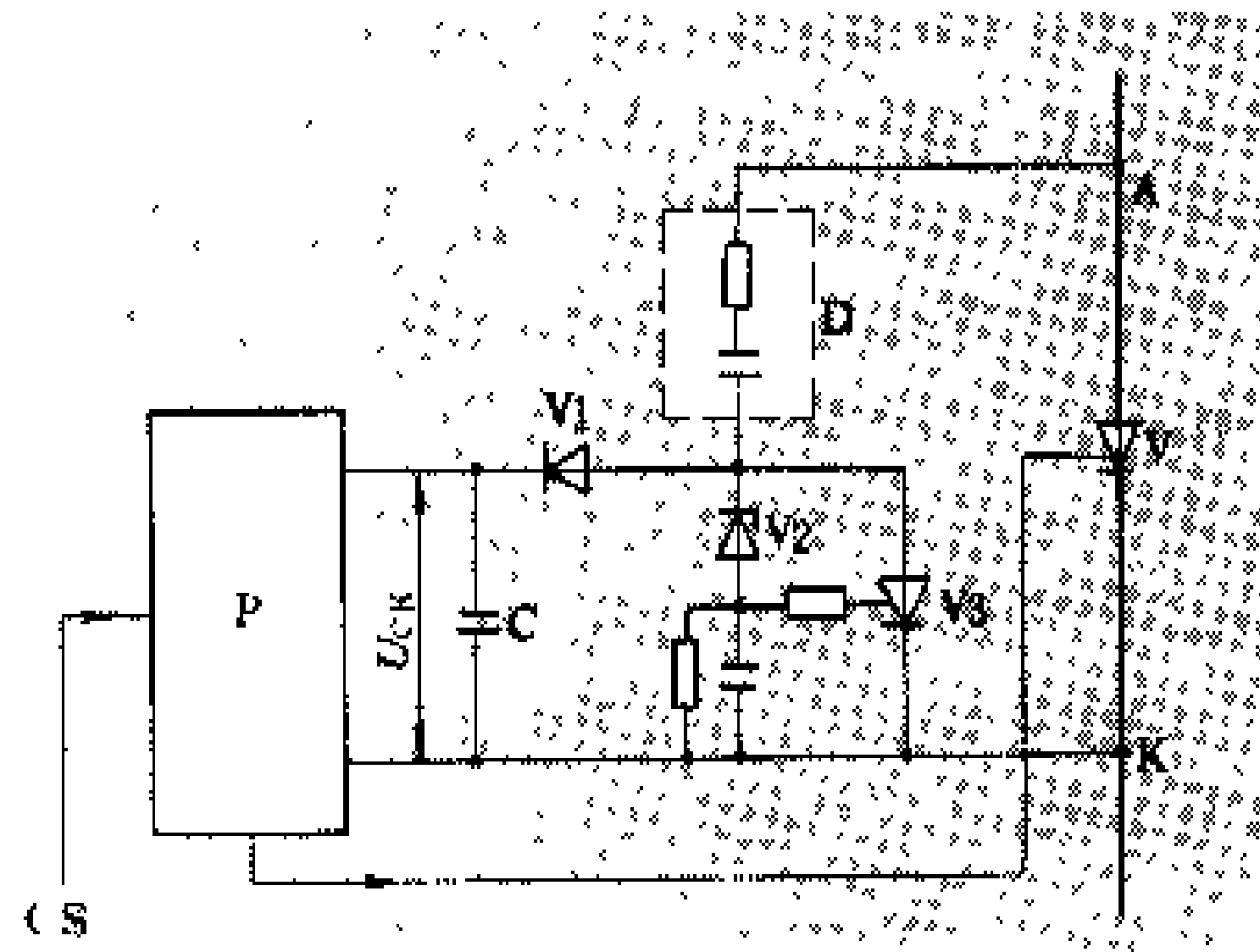


图 2 储能电路及其有关电路

A—元件阳极；K—元件阴极；V2—稳压管；C—储能电容；CS—控制信号；D—阻尼电路；V1—二极管；P—触发脉冲形成部件；V—主晶闸管；V3—小晶闸管； $U_{CK}$ —储能电压

**保护性触发电路** 又称 BOD (break over diode) 后备保护触发电路，由多个串联的转折二极管和带熔丝的限流电阻组成，连接于晶闸管元件的阳极和控制极之间。当正常触发系统故障，晶闸管元件正向电压超过允许值时，BOD 动作，即转折二极管开通。这时对晶闸管元件就补发一个保护性触发脉冲。随着晶闸管元件的开通，施加在 BOD 上的电压迅速下降，控制极电流也迅速下降。若晶闸管元件控制极与阴极间穿通，BOD 回路中将出现过电流，这时电阻内的熔丝就熔断，从而保护电子电路。

**监控电路** 监控电路对晶闸管元件和触发脉冲形成电路的输入、输出信号，晶闸管阀控制装置的输出控制信号以及 BOD 的动作情况进行监测。如果晶闸管元件损坏且相当于短路，那么晶闸管元件阻断电压消失，即可测知元件发生短路故障；如果 BOD 动作，则监控装置就指示晶闸管元件的触发脉冲形成系统故障；综合晶闸管触发脉冲形成电路和阀控制装置的控制信号，监控电路还能诊断触发脉冲形成系统中故障发生的部位。晶闸管监控电路通常能指示出阀组件中元件的损坏个数，根据损坏情况作出记录，还可灯光指示、音响报警，直至发出跳闸指令。

参考书目

戴熙杰主编，直流输电基础，北京：水利电力出版社，1990

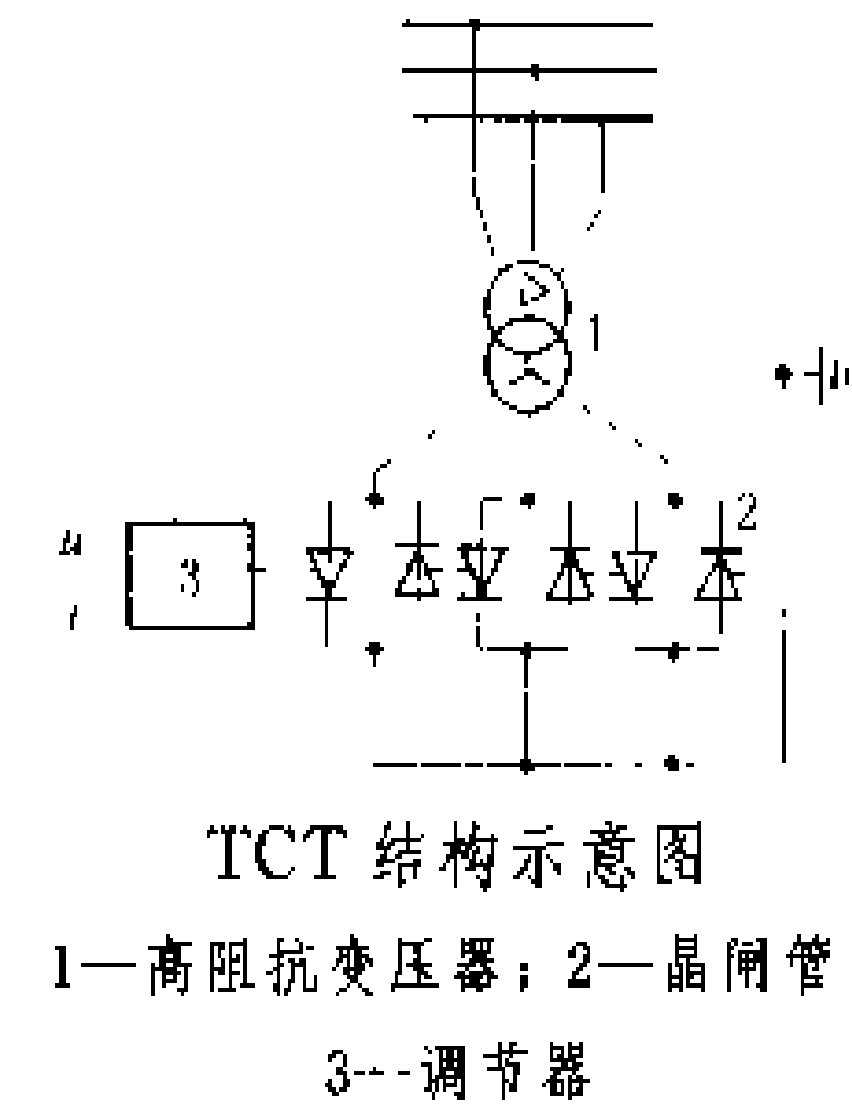
(林永生 赵礼生)

jingzhaguan kongzhi bianyaqixing jingzhi buchang zhuangzhi

晶闸管控制变压器型静止补偿装置 (thyristor controlled transformer, TCT)

用反并联晶闸管阀与高阻抗变压器串联来调节补偿无功功率的静止补偿装置。其主要优点是:①可直接接入高压系统,省去另配变压器;②配电装置简化;③用于工业企业中,可以将配电电压经高阻抗变压器再予降低,从而可用低压大电流并联方式的晶闸管阀代替高压串联方式的晶闸管阀,有时可带来结构设计上的便利。其主要缺点是:①损耗比较大;②滤波器必须接在高阻抗变压器的一次侧,在电力系统中 TCT 的滤波器往往要吸收系统中的谐波分量而引起过载。

结构原理 TCT 主要由高阻抗变压器、晶闸管阀和调节器组成,其结构如图所示。



TCT 结构示意图  
1—高阻抗变压器;2—晶闸管;  
3—调节器

高阻抗变压器的漏抗通常设计在 50%~100%之间,具体数值由整机的优化要求确定。高阻抗变压器的大量漏磁通将在变压器的铁磁件和油箱中引起大量涡流损耗和磁滞损耗,从而引起严重发热和油质老化。制造厂家采取磁屏蔽和拉直横向磁通等措施予以改善。

TCT 的工作原理与 TCR 相同。(见晶闸管控制电抗器型静止补偿装置)

用途 TCT 配以固定连接的电容器或滤波器,组成连续可调感性或容性无功功率的静止补偿装置,用于冲击负荷电力用户和电力系统,具体作用见静止补偿装置。

发展概况 自 1976 年起,日本的一些电气制造公司为钢铁企业提供 TCT 型静止补偿装置,单台容量为 1~10 Mvar,晶闸管阀的额定电压大约在 1kV 左右,与当时晶闸管器件的生产水平相对应。目前,日本仍有冲击负荷的电力用户推广应用 TCT,但较少用于电力系统。1979 年在加拿大 735 kV 输电系统的劳伦第德变电所投入了世界上当时应用于电力系统的最大的一套 TCT,其可调部分的容量为 450 MV·A。此后,TCR 逐渐取代了 TCT。

(刘伟云)

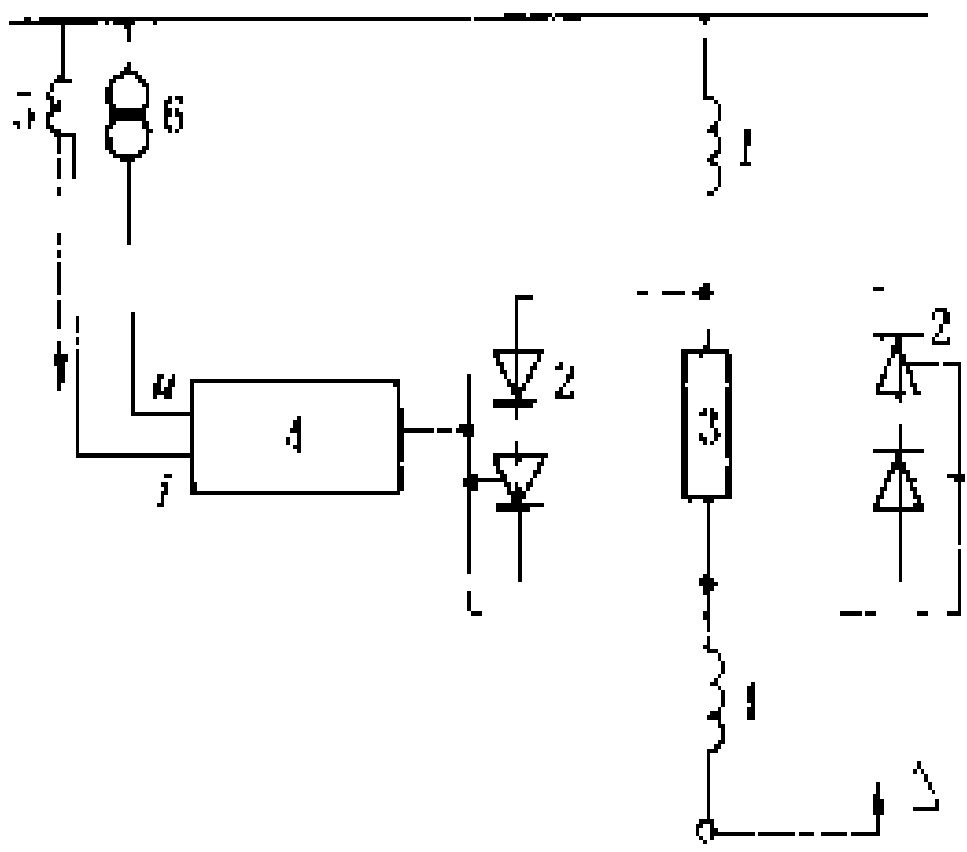
jingzhaguan kongzhi diankangqixing jingzhi buchang zhuangzhi

晶闸管控制电抗器型静止补偿装置 (thy-

ristor controlled reactor, TCR) 用反并联晶闸管阀与电抗器串联来调节补偿无功功率的静止补偿装置。其主要优点是:

①可在较广的范围内连续调节无功功率;②动态响应时间最少(约 5~10 ms);③运行可靠,本身不会引起过电压和电流突变现象。其主要缺点是:

①必须附加并联电容器才能发出无功功率;②产生一定数量的谐波



TCR 结构示意图

1—主电抗器;2—晶闸管;3—均压、监测、保护回路;4—调节器;5—电流互感器;6—电压互感器

电流,故通常多将附加并联电容部分设计为滤波器。

工作原理 TCR 主要由空芯电抗器、晶闸管阀和调节器等部分组成,其结构如图所示。

在正弦电压作用下,设电压的初相角为零,则在电抗器中的电流  $i_L$  受控于 TCR 晶闸管阀的触发角  $\alpha$ ,其基波有效值为

$$I_{L1} = \frac{U(2\alpha - 2\pi - \sin 2\alpha)}{\pi X_L}$$

TCR 分支等值电纳为

$$b_L = \frac{2\alpha - 2\pi - \sin 2\alpha}{\pi X_L}$$

TCR 吸收的无功功率为  $Q_L = U^2 b_L$ ,外加控制信号调节晶闸管阀的触发角  $\alpha$ ,就可以调节无功功率  $Q_L$ 。

$I_L$  的谐波有效值为  $\Sigma I_{Ln}$ , 其中

$$I_{Ln} = \frac{2U}{\pi X_L} \left[ \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} - \frac{2\cos\alpha \cdot \sin n\alpha}{n} \right]$$

式中  $n$  为 3, 5, 7...从而得最大谐波电流值列于表。

最大谐波电流值

谐波次数 $n$	3	5	7	9	11	13
谐波电流 $I_{Ln}(\%)$	13.78	5.05	2.59	1.57	1.05	0.75

在对称条件下,把 TCR 分支电路接成三角形,可消除 3 倍次谐波电流;把 TCR 接成互差 30°的十二脉波方式,可消除 5 次和 7 次谐波电流。

用途 TCR 配以固定连接的电容器或滤波器,所组成的连续可调感性或容性无功出力的静止补偿装置,是目前动态无功补偿的主要应用类型,被广泛应用

于冲击负荷电力用户和电力系统中。(见静止补偿装置)

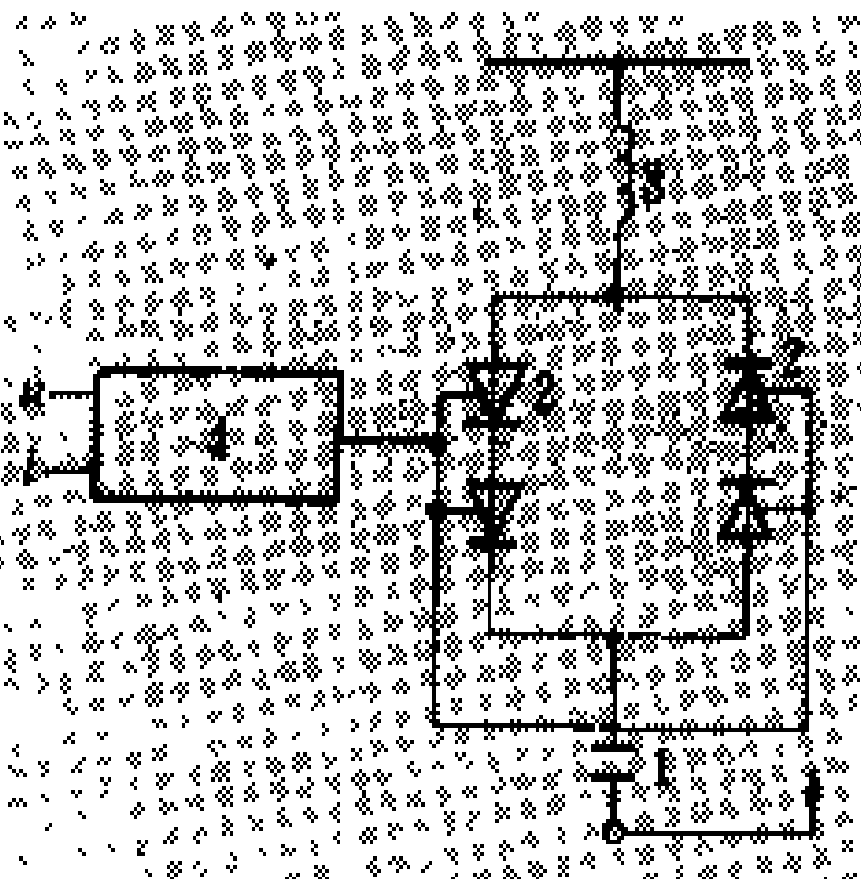
发展概况 自 20 世纪 70 年代初 TCR 开始进入工业应用阶段以来,已有上百套 TCR 投入运行,取得了良好的运行效果。随着固态电力电子器件和微型计算机技术的发展,TCR 的设备制造和应用功能正在迅速发展,将形成静止补偿装置的主要发展形式。

(刘倬云)

jingzhaguan touqie dianrongqixing jingzhi buchang zhuangzhi

**晶闸管投切电容器型静止补偿装置** (thyristor switched capacitor, TSC) 由反并联晶闸管阀和调节器控制经限流电抗器投切电力电容器的静止补偿装置。其主要优点是:①投切速度快;②投切时对电力系统无电流冲击;③直接产生无功功率;④结构简化;⑤有功损耗最少;⑥不产生高次谐波电流。其主要缺点是:①在正常断开后,晶闸管阀两端需承受两倍电源电压;②无功功率不能平滑调节而只能作级差调节。

工作原理 其结构如图所示,其中限流电抗器的作用是限制电容器投入时的暂态涌流和降低主电路引起的电流上升率,限流电抗器的感抗值约为容抗值的百分之几。



TSC 结构示意图  
1—电容器组; 2—晶闸管; 3—限流电抗器; 4—调节器

在电源电压瞬时值最大时,晶闸管阀接受调节器发来的触发脉冲而导通,使电容器在电流过零时开始通电,此电流半波将在电容电流再次回零时由晶闸管阀予以自然关断。由于 TSC 的调节器是每隔半波便向晶闸管阀发出一次触发脉冲,所以电

容器中流过的电流为连续正弦波。

在电容器已充电的条件下,若电源瞬时电压的极性与电容器残压相反,即在晶闸管阀两端承受数倍电源电压时,如果调节器误发触发脉冲,则在电容器上将引起  $(2n+1)$  倍的过电压,在晶闸管上将引起  $2n \sim 2(n+1)$  倍的过电压 ( $n$  为晶闸管连续误触发的次数),并将在 TSC 回路中引起严重的暂态大电流和越限的电流上升率,以致损坏设备。

技术性能比较 晶闸管投切电容器型静止补偿装置与用断路器或负荷开关分组投切的电容器组(BSC)的技术性能比较如表。

TSC 与 BSC 的技术性能比较

项目	TSC	BSC
投切元件	晶闸管	断路器等开关设备
投切特点	①在电流过零时投切接通与切断电流时都没有暂态分量,不引起过电流、过电压等问题 ②投切时间均不大于 10 ms ③可连续投切,且对两次投切之间的间隔时间不作限制	①在任意角度投切,投入时有电流冲击,切断时有暂态截流过程,会发生过电压问题 ②投入时间约 80 ms,国外最新断路器约 40 ms ③在刚切除后需待电容器放电后(约数分钟)才允许再次投入,因而在短期内连续投切
工作可靠性	可靠性高,不限制投切次数	因为开关设备触头及传动机构容易损坏,一般每日只允许投切几次
应用特点	适用于冲击性电力负荷和电力系统中作动态无功补偿,也适用于静态调相、调压	适用于稳定负荷和电力系统中作静态无功补偿

用途 TSC 适用于主要要求补偿感性无功功率且不必平滑调节的冲击负荷电力用户和电力系统。TSC 在电力系统中用以抑制系统功率振荡,其效果比其它各类型静止补偿装置都好。TSC 的具体作用见静止补偿装置。

发展概况 第一套大型 TSC 工业装置是 1972 年由瑞典 ASEA 公司生产,安装在瑞典一家大型钢铁厂的 60 Mvar 装置,用于对电弧炼钢炉实现电压闪变抑制和提高经济效益,其晶闸管阀的额定电压是 20 kV。1980 年,瑞典 ASEA 公司首先把 TSC 装置用于南非的 132 kV 输电系统,其计有四组 5 Mvar 的 TSC 和两组 5 Mvar 的 TCR,晶闸管阀的额定电压是 2.4 kV。1981 年,中国平顶山至武汉的 500 kV 输电系统,在凤凰山变电所从 ASEA 公司引进了两套 60 Mvar 的 TSC,分别与两套 60 Mvar 的 TCR 组成混合型动态无功补偿装置,其晶闸管阀的额定电压是 8 kV,主要用作经常性的调相和调压。

(刘倬云)



jingzhi buchang lübo zhuangzhi

# 静止补偿滤波装置 (harmonic filters for static compensator)

供滤除静止补偿装置本身及其非线性负荷产生的高次谐波用的滤波装置。常由几组适于谐波源特性的无源滤波器组成,也可能由一组有源滤波器构成。

**无源滤波器** 由滤波电容器(或经过电压、过电流及有功损耗校核符合使用要求的并联电容器)、电抗器和电阻适当组合而成的滤波器,运行时与谐波源并联,兼作无功电源。无源滤波器的优点是结构简单,运行可靠,维护方便。

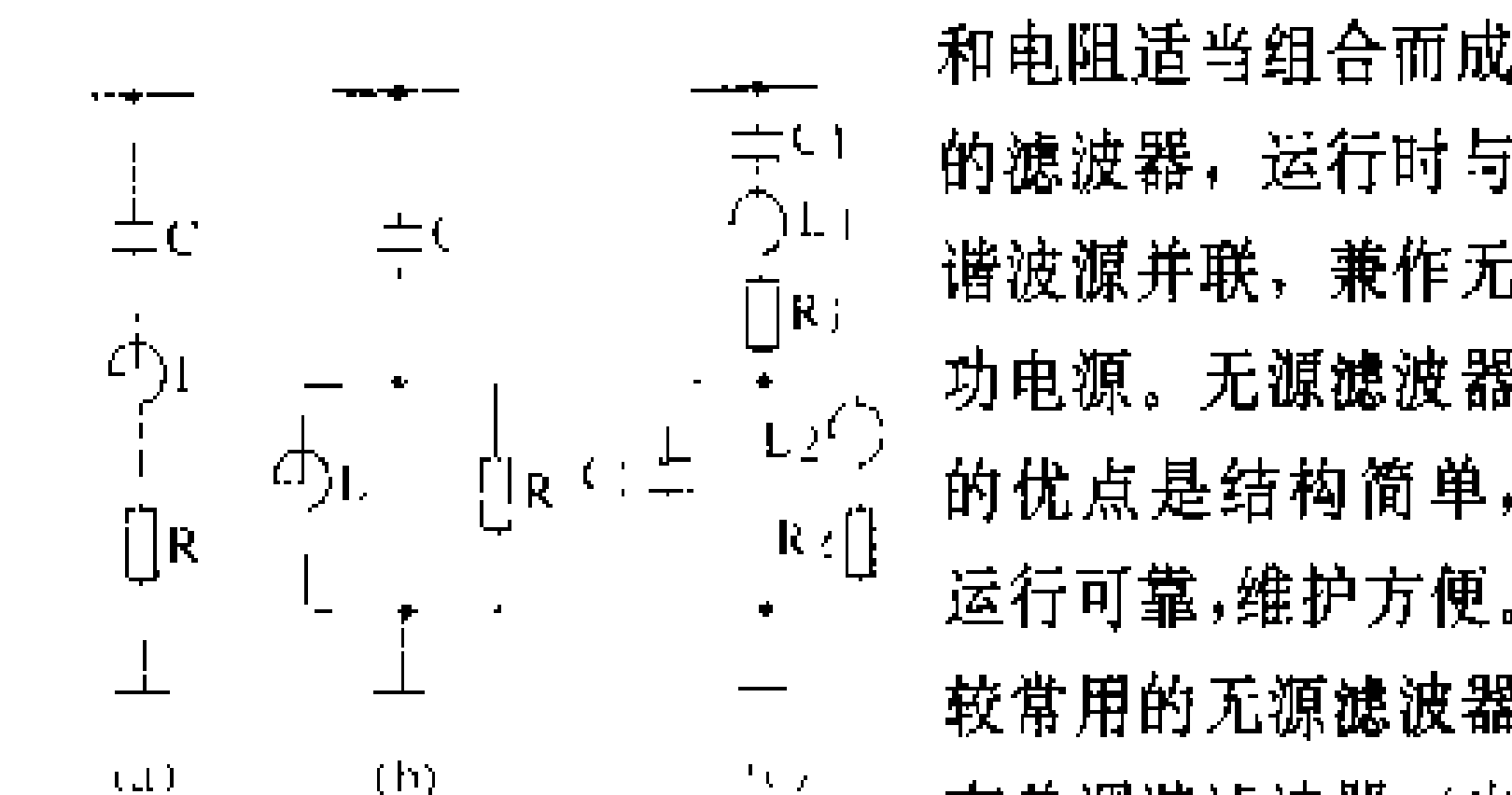


图1 较常用的三种无源滤波器的原理接线  
(a) 单调谐滤波器; (b) 高通滤波器; (c) 双调谐滤波器

较常用的无源滤波器有单调谐滤波器(也称单通滤波器)、高通滤波器和双调谐滤波器(也称双通带滤波器)三种,其原理接线如图1所示。

**单调谐滤波器** 由图1(a)所示的RLC串联谐振电路构成。若 $\omega$ 为额定角频率,需要滤除的谐波为 $n$ 次谐波,则 $n\omega L=1/(n\omega C)$ ,滤波电路阻抗 $Z=R$ , $n$ 次谐波电流将主要通过低值电阻 $R$ 分流而很少流入系统,从而使该次谐波电压大为降低。

**高通滤波器** 常用的接线如图1(b)所示,由于电感 $L$ 被电阻 $R$ 旁路,其并联合成阻抗不可能超过电阻值,因此它不像单调谐滤波器只对某一频率呈低阻抗,而是有一个较低阻抗的频率范围。滤波器阻抗 $Z_f$ 与频率 $f$ 的关系是 $Z_f=R\{a^2/(1+a^2)-j/[a(1+a^2)]\}$ ,其中 $a=f/f_0$ , $f_0=1/(2\pi CR)$ 称作截止频率。当 $f<f_0$ 时, $Z_f$ 明显增加,使低次谐波电流难以通过。反之,当 $f>f_0$ 时, $Z_f$ 明显降低,而且变化不大;当 $f\rightarrow\infty$ 时, $Z_f\rightarrow R$ 。这说明滤波器具有很宽的通频带,可以滤除 $f>f_0$ 的高次谐波。

**双调谐滤波器** 接线如图1(c)所示,其中 $C1L1R1$ 构成串联谐振回路, $C2L2R2$ 构成并联谐振回路。这种滤波器可实现两个单调谐滤波器的功能,而基波损耗较少,但由于结构比较复杂,调谐困难,实际上

程中不太常用。

**有源滤波器** 工作原理如图2所示,滤波器利用可关断晶闸管产生与负荷电流 $i_L$ 中的谐波分量( $i_L-i_s$ )大小相等、相位相反的谐波电流 $i_r$ 来消除谐波。由于技术经济原因,这种滤波器尚未在实际工程中应用。

**滤波装置原理接线** 静止补偿滤波装置通常是由滤波电容器构成的

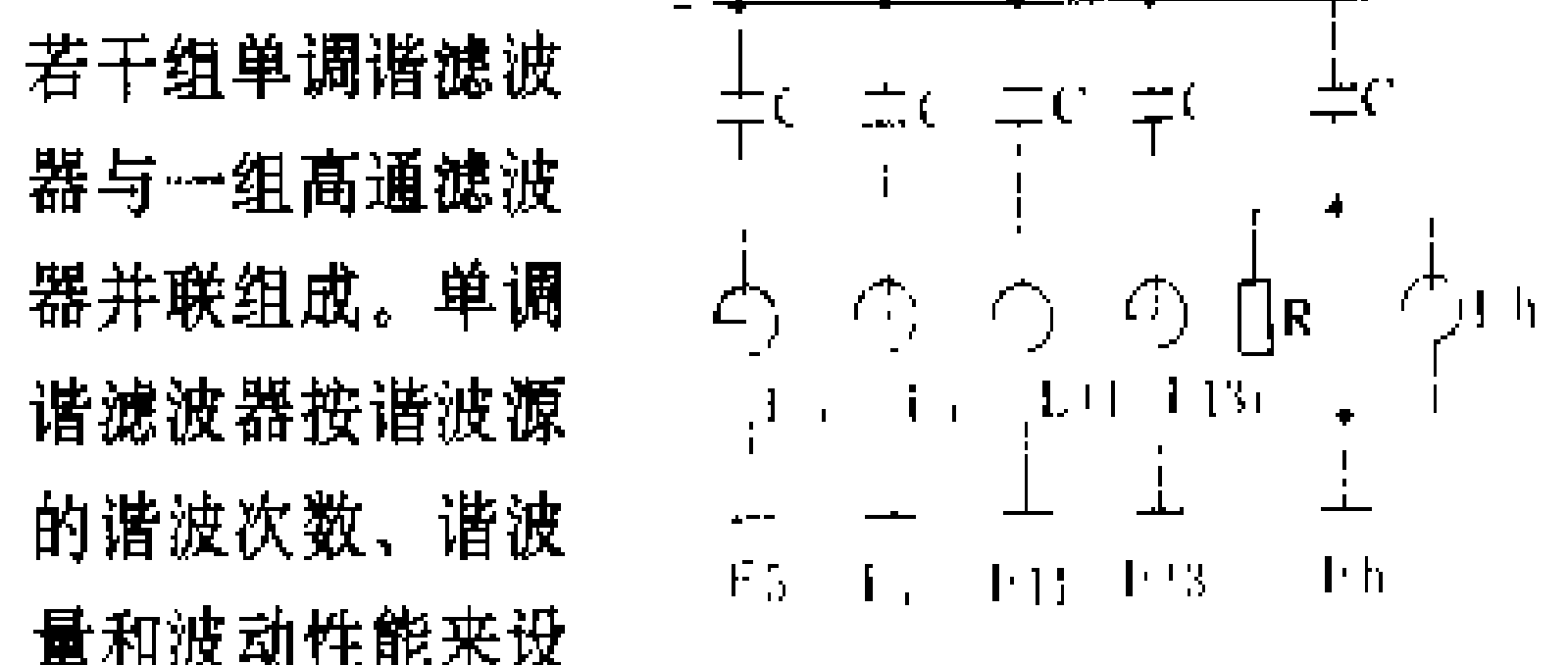


图3 静止补偿滤波装置原理接线  
如轧钢机电用负荷 C—滤波电容器组; L5、L7、L11、L13—5、7、11、13次谐波调谐电感; Lh—高通滤波器调谐电感; F5、F7、F11、F13—5、7、11、13次单调谐滤波器; Fh—高通滤波器

单调谐滤波器,如果还要求滤除15次及以上的谐波,则再设一组截止频率为14次的高通滤波器,如图3所示。对于电弧炉负荷,由于产生连续谐波,一般单调谐滤波器需从2次谐波开始设起。

(何丰仁 马延绪)

jingzhi buchang zhuangzhi

# 静止补偿装置 (static var compensator, SVC)

由电容器、饱和电抗器或线性电抗器、滤波器、晶闸管和专用调节器等静止设备组成的能快速调节无功功率的并联补偿装置,也称静止型动态无功补偿装置,简称静补。其主要优点是:①动态响应速度快,大多能在5~20ms的动态响应时间内跟踪输入信号以调节无功出力;②投入快,无需附加起动设备;③不存在失步问题;④无功出力可调范围大,设计灵活,并可分期发展;⑤无旋转部件,运行可靠性高;⑥加装后不增大电力网的短路容量;⑦可用风冷或少量冷却水来冷却;⑧安装、运行和维护方便;⑨有功损耗小,年运行费低。其主要缺点是:①当电力网电压下降较大时,其无功出力将按电压平方的比例下降;②除个别型式外,在运行中均产生高次谐波电流。

**主要性能参数** 有额定电压、额定无功功率和动态响应时间。额定电压分为静补连接点的电网额定电压和静补无功调节部件的额定电压。额定无功功率是在设计规定的工作电压和环境温度等条件下,静止补偿装置在正常运行中所能发出和吸收的无功功率。动态响应时间是指在静止补偿装置实现阶跃调节的过程

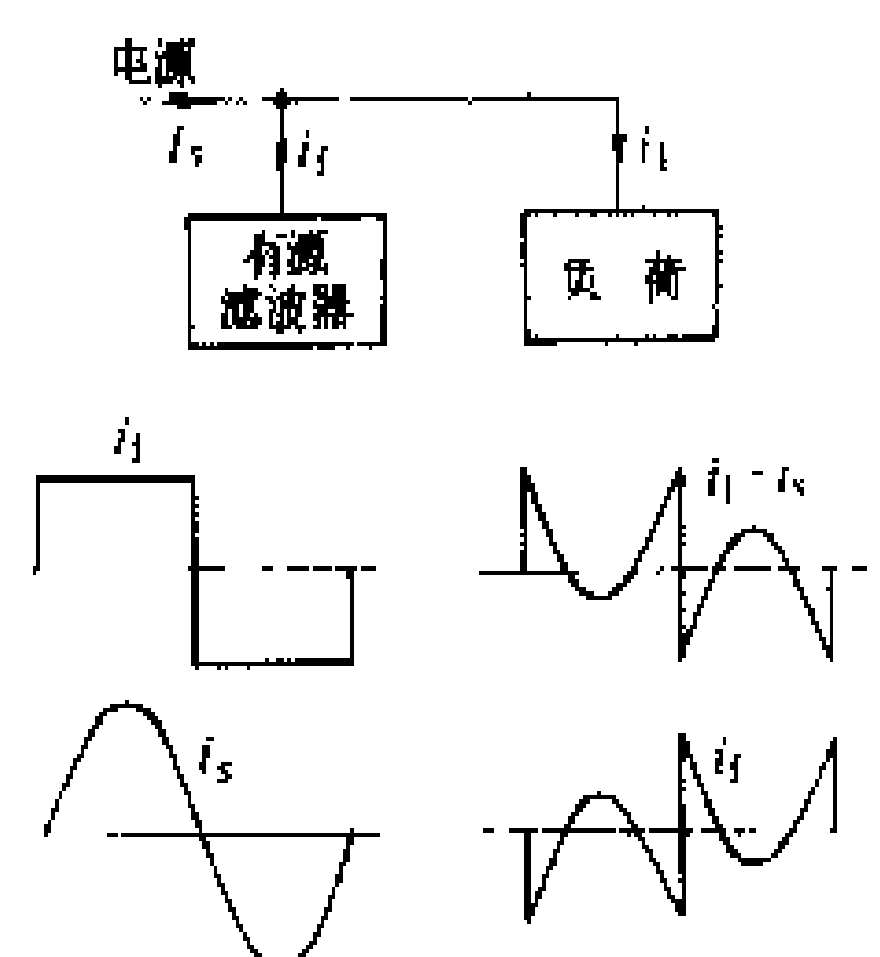


图2 有源滤波器工作原理

中,由0.1级差调节量调至0.9级差调节量所需的时间,通常记作 $t_R$ 。 $t_R$ 是静止补偿装置的重要性能指标。

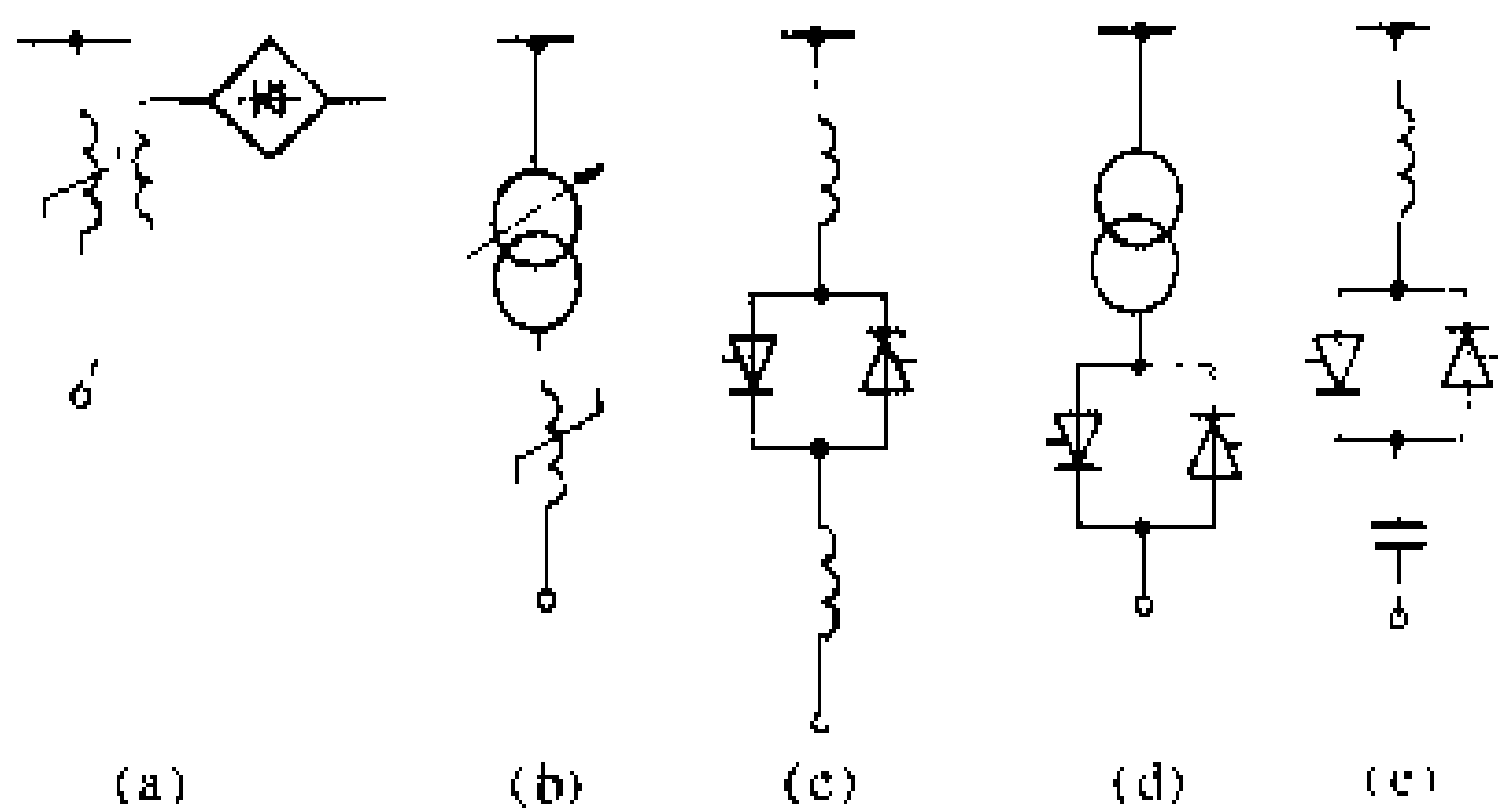
用途 静止补偿装置主要用于冲击性负荷用户的就地补偿和用于电力系统中实现对系统的无功补偿。

(1)用于冲击性负荷用户的无功补偿,如用于轧钢机、矿山绞车、电弧冶炼炉、电焊机、电气机车、高能加速器、频繁起动的电动机等。其作用是:①补偿负载在动态过程中所需的无功;②调整电压,减少电压波动和电压闪变;③改善功率因数;④滤除大部分高次谐波,改善电压波形;⑤在不平衡负载处起平衡化作用;⑥提高冲击负载设备及其邻近电气设备的运行安全性。

(2)用于电力系统,其作用是:①在枢纽变电所或终端变电所灵活地补偿无功功率,提供随机性调相功能;②按指定要求调整系统电压;③提高电力系统的静态稳定性和暂态稳定性,提高输电线路的输送功率。因为静止补偿装置在提供应急无功功率时的动态响应速率约比调相机快10倍,所以它不但能弥补其无功出力按端电压平方成比例下降的弱点,而且在支撑节点电压和改善暂态稳定性方面能发挥出优越的作用;④改善电力系统的电压稳定性,防止突发事故造成的电压崩溃;⑤提供阻尼力矩以抑制电力系统的功率振荡;⑥抑制电力系统的次同步谐振;⑦吸收电力系统中突然涌现的过剩无功,抑制暂时过电压;⑧减少系统中的负序电流分量,对连接点的三相电压起平衡作用;⑨对直流输电系统的换流站,提供换相无功和实施电压控制。

主要类型及性能 静止补偿装置主要有可控饱和

电抗器型(CSR)、自饱和电抗器型(SR)、晶闸管控制电抗器型(TCR)、晶闸管控制变压器型(TCT)和晶闸管投切电容器型(TSC)等五种类型。各种类型的接线示意如图所示。不同类型的装置还可灵活组合构成混合型静止补偿装置。



几种主要类型的静止补偿装置接线示意图  
(a) CSR; (b) SR; (c) TCR; (d) TCT; (e) TSC

除TSC型以外,其余类型的静止补偿装置均产生高次谐波电流,通常都需要配以适当的滤波器组(FC),而这些滤波器又是工频无功电源。因此,可构成CSR+FC、SR+FC、TCR+FC及TCT+FC等组合模式。

几种主要类型的静止补偿装置的技术性能和适用范围的比较见表。

专用调节器 TCR、TCT及TSC型静止补偿装置均依靠调整晶闸管的触发角来实现无功功率的快速调节。专用调节器检测有关电流、电压、有功功率、无功功率等信号,经处理和运算后发出所需触发脉冲,从而控制晶闸管的导通情况。专用调节器的调节主要有

几种主要类型的静止补偿装置技术性能和适用范围比较表

比较项目	CSR	SR	TCR	TCT	TSC
动态响应时间(ms)	40~100	10~20	10~20	5~10	10~20
能否连续调节	能	能	能	能	能,但有级差
过载能力	约1.3倍	短期3~5倍; 较长期1.3倍	1.3倍,1s	1.3倍,1s	1.3倍,1s
产生高次谐波情况	很大	最少,但在不对称运行工况下谐波增大	较少,但在不对称运行工况下有非特征谐波	较少,但在不对称运行工况下有非特征谐波	无
能否设置控制系统	可以,但反应较慢	不能,SR自呈恒电压特性	可灵活设置控制系统以形成各种控制功能	可以	可以设置级差调节的控制系统
能否分相控制及有无平衡化功能	不能,在运行效果上略有平衡化作用	不能,在运行效果上有改善不平衡度作用	能,适于用以充分发挥平衡化作用	能,可起平衡化作用,但有局限性	能,只能按级差调节起到平衡化作用

续表

比较项目 \ 型 式	CSR	SR	TCR	TCT	TSC
是否需配有载调压变压器	不要求	一般必配	不要求	不要求	不要求
噪声 (dB)	约 100 以上	约 100 左右	约 75	约 85	约 60 以下
有功损耗 (%)	1.5 以上 (铁损为主)	1.5 以上 (铁损为主)	0.7 左右	1.5 以上 (主要不是铁损)	0.3 左右
检修条件	内部修理较占时间	内部修理较占时间	器件更换快	器件更换快, 变压器修理费时	器件更换快
在工业电网中的适用范围	都可选用, 取决于用户对技术性能、价格、供货期等的具体评价; 作为平衡化手段, 宜选 TCR 型; 从动态响应时间和电压闪变改善的要求, 宜选 TCR 型				
在电力系统中的适用范围	不适用	适用于控制暂时过电压	广泛适用, 尤其适用于调制系统特性	可适用, 其所配滤波器必须放在高压侧, 故容易过载	可适用, 尤其适用于抑制系统功率振荡
价格	较 贵	较贵, 在抑制过电压幅值下可能最便宜	一般最便宜	较便宜, 在直接接入高压处可能最便宜	较便宜, 在特定条件下可能最便宜
国外动向	不再生产	仍生产, 但订货少	订货最多	日本在冶金系统广泛应用, 德国也有销售	有需求, 美国在中压电网中广泛采用

开环方式和闭环方式两种。开环控制调节速度快, 适用于电弧炉一类的快速冲击负荷以及在电力系统中用以提高暂态稳定性与抑制暂时过电压; 闭环控制调节误差小, 适用于维持电网节点电压等。目前所用的专用调节器多为集成电路和微处理器结构。专用调节器是静止无功补偿装置的指挥中心, 对其功能的形成有决定性作用。

发展概况 20 世纪 60 年代初, 首先研制出 CSR 型静止补偿装置, 之后英国 GEC 公司又研制出 SR 型, 并在 1964 年应用于工业冲击负荷用户, 以后又将它应用于远距离输电线路的中间变电所, 以提高线路电压和输电能力, 以及应用于输电线路末端, 实现调相调压功能和抑制暂时过电压。70 年代以来, 随着固态电力电子器件的迅速发展, 以晶闸管为主体的各种静止补偿装置也有了迅速的发展。目前, 各种晶闸管类静补装置已成为国外的主要选用型式, 一批中型以至大型的 TCR、TCT 与 TSC 已被广泛应用于大型电弧冶炼炉、大型轧钢机等冲击负荷用户。1979 年, 在加拿大 735 kV 输电系统的劳伦第德 (Laurentide) 变电所, 有一套 350 Mvar (容性)、100 Mvar (感性) 连续可调的 TCR+FC 投入运行。到 80 年代末, 连同 SR 型在内, 已有数以百计的各种类型的静止补偿装置投入了运行。

在中国, 1978 年武汉钢铁公司的冷轧广和热轧广

引进了四套共 145.4 Mvar 的 CSR 型 (比利时制造) 静止补偿装置, 最大的一台容量是 60 Mvar, 各台的动态响应时间都是 60 ms。1981 年, 又在平顶山至武汉的 500 kV 输电线路末端的风凰山变电所, 引进两套 TCR (60 Mvar) +TSC (60 Mvar) +FC (60 Mvar) 混合型大容量静止补偿装置。此后在一些 500 kV 输电系统和钢厂、煤矿等处又分别从国外引进了十多套静止补偿装置, 均为晶闸管型。

中国电力科学研究院等单位联合研制了二-三柱和三-三柱 SR 型静止补偿装置, 分别于 1986~1987 年在西南铝加工厂、重庆钢铁公司投入运行。北京变压器厂等单位联合研制了 TCT 型静止补偿装置 (容量为 6 MV·A), 于 1988 年在济南钢厂投入运行。西安电力机械制造有限公司引进瑞士原 BBC 公司技术, 制造了 TCR 型静止补偿装置 (容量为 35 MV·A), 于 1990 年在大冶钢厂投入运行。

参见彩图插页第 14 页 42 图。

参考书目  
Miller T J E. Reactive Power Control in Electric Systems. New York: John Wiley & Sons, 1982  
(刘倬云)

jingzhi buchang zhuangzhi jidian baohu  
**静止补偿装置继电保护** (static compensator



relay protection) 静止补偿装置故障或不正常运行时,为减轻其损坏程度和防止影响系统安全运行而采用的动作于跳闸或信号的自动装置。一般分为并联电容器组(包括滤波器)保护、并联电抗器(包括饱和电抗器)保护、晶闸管阀组保护和调节器保护四部分。

并联电容器组保护 通常设电容器内部故障保护(包括单台熔断器和内部故障继电保护)、相间短路与过负荷保护(常用带速断的反时限过电流继电器来完成)和过电压与低电压保护(见并联电容器组继电保护)。

并联电抗器保护 高、中压油浸式并联电抗器通常设瓦斯保护、纵差保护、过电流保护和过负荷保护;干式电抗器通常仅设过电流保护和过负荷保护。对大型重要的干式电抗器加设距离保护,在回路阻抗增大或减少超过规定极限时动作(见并联电抗器继电保护)。

晶闸管阀组保护 通常设:①过电压保护,包括晶闸管阀组两端出现过电压时使阀组立即导通以防击穿的过电压保护接线和跨接在每对反并联晶闸管阀上以限制暂时过电压的电阻电容保护;②过负荷保护,包括监测晶闸管接点温度的过热保护和冷却介质温度与流量的连续监测装置;③晶体管故障监测器,利用跨接在电阻电容保护电容器上的发光二极管来监视,晶闸管正常运行时发光二极管发光,晶闸管故障击穿时发光二极管熄灭,必要时光信号可通过光导纤维传送到控制室的指示单元。

调节器保护 通常设:①调节器故障保护,当响应电压与参考电压之差超过整定值并持续一定时间后动作于跳闸;②低电压保护;③控制回路故障保护;④冷却装置故障保护;⑤辅助电源故障保护。

(何丰仁 马廷绪)

jingzhi buchang zhuangzhi shiyan  
**静止补偿装置试验** (static compensator tests) 在静止补偿装置的制造、出厂、交接、运行和检修中,为检验其性能与质量,以保证安全经济运行而需进行的各项试验。按试验的不同性质分为型式试验、出厂试验、交接试验、大修中试验和运行中预防性试验。根据国际电工委员会(IEC)和中国有关标准、规程,国际电气装置安装工程施工及验收规范以及制造部门产品标准的规定,静止补偿装置的试验项目如表所列。

静止补偿装置的试验项目

试验对象	项 目	型式试验	出厂试验	交接验收试验	大修中试验
并联及饱和电抗器	绕组直流电阻测量		✓	✓	✓
	交流阻抗测量		✓	✓	
	伏安特性谐波分量测量	✓		✓	
	额定损耗测量		✓	✓	
	额定负载下振动试验		✓	✓	
	额定负载下噪声试验		✓	✓	
	过负荷能力试验			✓	
	额定温升试验	✓		✓	
滤波器	耐压试验		✓	✓	
	滤波电容器组不平衡电流及负序电流测试			✓	
	各个滤波支路调谐特性及谐振点的试验			✓	
	合闸冲击电流试验			✓	
晶闸管阀组	阀基直流电压试验	✓			
	阀基操作冲击电压试验	✓			
	阀陡波冲击电压试验	✓			
	周期性开通和熄灭试验	✓			
	非周期性开通试验	✓			
	温升试验	✓			
	阀的损耗试验	✓			
	辅助设备检查	✓			
	连接检查		✓		
	均压回路检查		✓		
	开通检查		✓		
	耐受电压检查		✓		
	开通和关断检查		✓		

续表

试验对象	项 目	型式试验	出厂试验	交接验收试验	大修中试验
控制系统	耐压和绝缘检查	✓	✓		
	开环特性试验	✓	✓		
	小电流闭环试验	✓	✓		
	大电流闭环试验	✓			
	附加功能检查试验	✓	✓		

(何丰仁)

jingzhi buchang zhuangzhi yunxing jianxiu

**静止补偿装置运行检修** (static compensator operation and maintenance) 为保证静止补偿装置长期安全经济运行而进行的运行中的巡视检查、定期维护、投切操作、异常运行与事故处理以及定期的停电检查和修理。

静止补偿装置运行 主要内容有:①巡视检查,可分为定期检查、特殊检查和投运前检查三种。定期检查的内容包括仪表监视、设备外部检查和运行分析。仪表监视主要是对运行电压、电流和温度的监视,并将这些参数严格控制在制造厂允许范围内运行。设备外部检查项目主要有电容器的外壳鼓肚、渗漏,套管及熔断器状况,电抗器的振动、噪声、温升、渗漏油及结构件松动、发热情况,以及晶闸管阀的故障监测器等。运行分析内容包括油和设备绕组温升与负荷及冷却介质温度的关系,油位与油温关系以及对巡视中发现问题的分析,如电容器外壳轻微鼓肚、单台熔断器熔断等。特殊检查主要是在气象条件恶劣(如大雾、雷雨、冰雪、高温等)或发生故障时有针对性地进行。投运前的检查,目的是确定设备是否具备带电投运条件。②定期维护,主要包括清扫、检查、校验、取油样和必要时加油等工作。③投切操作,除自动投切外,一般由值班人员根据调度部门颁发的电压曲线进行。④异常运行和事故处理,最常见的情况是渗漏油,电容器外壳鼓肚,熔断器熔断,电抗器温升、振动、噪声异常,晶闸管故障监测器动作及继电保护动作跳闸等。对这些异常情况应先查明原因,再设法处理,必要时可停电修理。对已经跳闸形成事故者,按事故处理规程规定执行(见并联电容器组运行维护、并联电抗器运行检修)。

静止补偿装置检修 主要包括电抗器检修和电容器检修两部分,晶闸管阀组和调节器一般仅需作定期清扫、调试与校验。油浸式电抗器的检修,中国设备可参照《电力变压器运行规程》执行,外国产品按制造厂

的规定进行。油浸式电抗器大修时,除常规项目外还需着重检查铁芯及结构件有无松动和局部过热情况。油浸式电抗器一般每年进行一次小修,主要内容是清扫套管,紧固接头,处理渗漏油等缺陷,油箱及附件检修涂漆,校验各种仪表和保护装置,进行预防性试验等。干式电抗器一般仅作小修,主要内容是检查和清扫绕组及冷却

风道,必要时补漆,检查和处理附件的绑扎紧固情况,检查焊接及端子板接触情况,清扫支持绝缘子,进行预防性试验等。电容器也仅需作小修,主要是清扫,油漆,检查渗漏油、外壳鼓肚和各连接部分的紧固等情况,并作必要的处理。

(何丰仁 马延绪)

jingzhi wugong fashengqi

**静止无功发生器** (static var generator, SVG) 利用半导体换流电路发出或吸收无功功率的装置。静止无功发生器主要用于动态无功补偿,是一种很有发展前途的新型无功电源。根据半导体换流电路的不同构成,静止无功发生器可分为电压源型、电流源型和功率倍增型三种。

工作原理 不同类型的静止无功发生器,其工作原理也因换流电路的构成不同而不同。

(1) 电压源型静止无功发生器。其原理接线如图1(a)所示,同步电动势由半导体变流器逆变产生,直流电容器C上的直流电压经过强迫换相式逆变器U转变为三相交流方波电压。为了改善电压波形,减少谐波,采用多重化的方法,用变压器连接具有一定相位差的多组逆变器(例如6组),在变压器另一侧就得到了接近正弦波形的阶梯波电压。另外,用可关断晶闸管或大功率晶体管制作静止无功发生器,采用脉宽调制方式也能有效地改善波形。在静止无功发生器的触发控制电路中采用锁相技术,可以保证逆变电压与系统电压同步。当静止无功发生器并入系统时,逆变电压通过变压器的漏电抗与电网相连接,其等值图与调相机的等值图相同,如图1(b)所示。调节逆变电压与系统电压之间的相对角(相当于损耗角),就可以控制逆变电压的高低。当逆变电压高于系统电压时,静止无功发生器向系统发送无功功率。当逆变电压低于系统电压时,静止无功发生器从系统吸收无功功率。由于静止无功发生器输出的是无功功率,三相功率瞬时值相加总是为零,直流电源不输出功率。所以静止无功发生器的

直流端不需要单独的电源支持，一般只接一个直流滤波电容器。静止无功发生器的有功损失是由所连接的系统供给的。

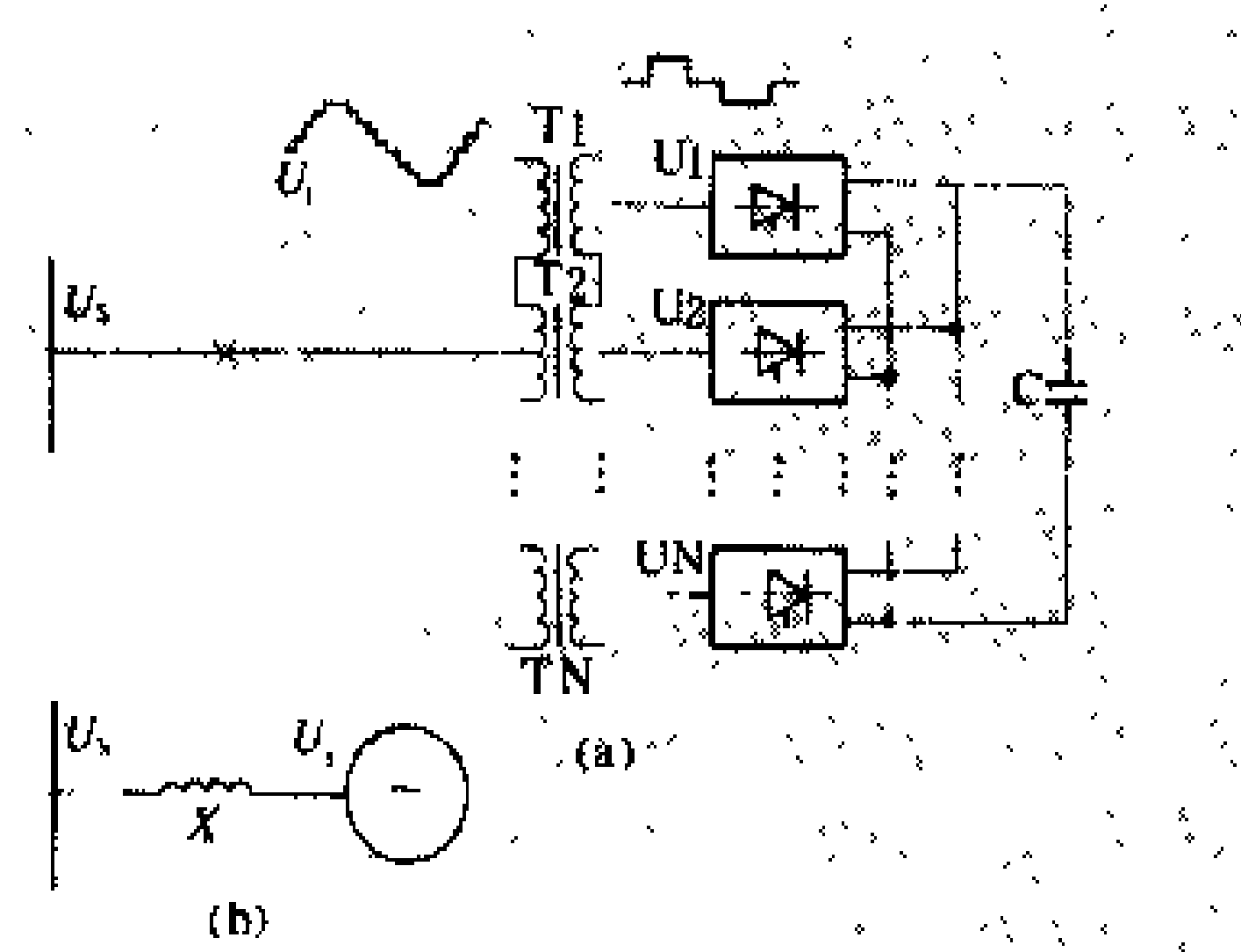


图1 电压源型静止无功发生器原理接线  
(a) 原理接线；(b) 等值电路

(2) 电流源型静止无功发生器。其直流端不是采用电容器滤波而是用电感滤波。使用电流型逆变器把直流电流变为三相交流。采用多重化方法可以改善电流波形和减少谐波。电流源型静止无功发生器输出的三相电流也是阶梯波。

(3) 功率倍增型静止无功发生器。采用交流变交流的变频器构成，原理接线如图2所示。其两端都是接在交流系统，一端串联电抗器，变频器把三相交流电力系统电压变为另外一组三相同频同相的交流电压，电压幅度不同，通过电感与同一电网联接。对电力系统来说，其无功功率吸收量是双倍的，所以称功率倍增型。

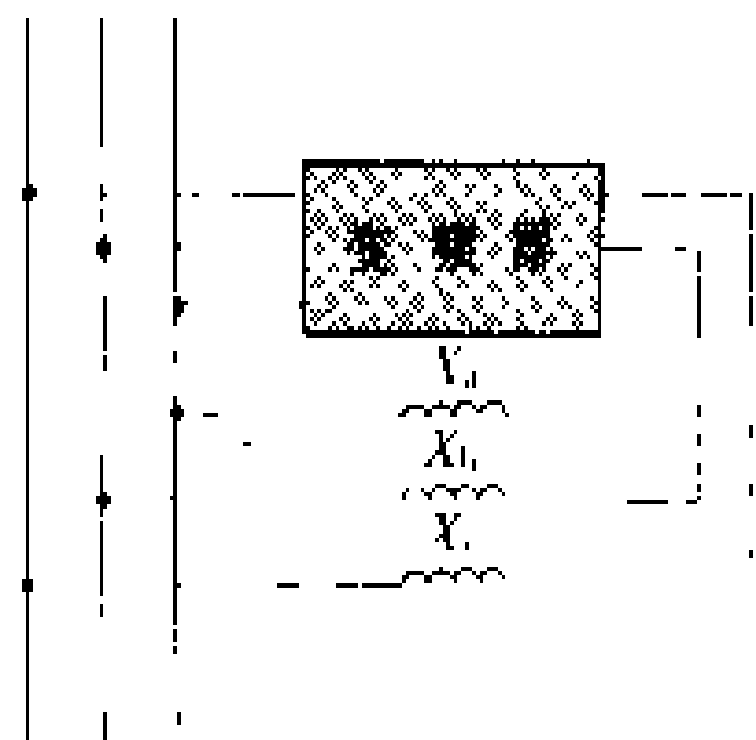


图2 功率倍增型静止无功发生器原理接线

用途 ①用于电弧炉、轧钢机等冲击性负荷作动态无功补偿，以减少电压波动和电压闪变；②用于电力系统枢纽点以提高系统稳定性；③采用特殊的控制方法，还可以用作负序电流补偿器，补偿不对称负荷，也可作有源滤波器，消除高次谐波。

主要优缺点 静止无功发生器的优点有：①由于它是利用交流三相之间能量的转移与平衡来发出无功功率的，不需要大容量的储能电容器和电抗器，结构紧凑，占地面积小；②起动平稳，对系统无冲击；③无功出力可以在-100%（感性）~+100%（容性）的范围内平滑连续调节；④动态响应迅速，响应时间一般为30~100 ms，适合冲击性负荷或电网的突发性无功需

求；⑤无转动部分，维护容易，运行噪声低。主要缺点有：①有功损耗较大（约为2%~3%）；②结构复杂，价格高；③过载能力差；④其可靠性与半导体器件的质量密切相关，目前可靠性还不高。

发展概况 静止无功发生器是一种新型的无功补偿装置，还处于原理研究和工业试验阶段。1981年日本关西电力公司研制成功容量为20 Mvar的电压源型静止无功发生器工业试验样机，进行了长达9个月的并网运行试验，取得了满意的效果，并在此基础上设计了容量为120 Mvar的静止无功发生器，后来因经济原因而没有实际制造。1988年美国西屋电气公司研制成功容量为1 Mvar采用可关断晶闸管元件的静止无功发生器试验装置。另外，苏联、德国、意大利等国也在积极进行研究工作。中国也开展了静止无功发生器的研究。1985年华北电力学院研制了容量为10 kvar电压源型静止无功发生器试验装置，并进行了原理鉴定。1988年东北电力学院研制了采用可关断晶闸管元件的同类装置。随着半导体换流技术的发展和半导体元器件性能的提高，静止无功发生器将越来越广泛地应用于工业中。

（石新春）

jubu fangdian shiyan

局部放电试验 (partial discharge test)

用仪器对被试品在承受高电压作用时产生的局部放电信号进行的探测和测量。局部放电是指发生在电极之间但不完全连通两电极的放电，它会产生下述效应：①在提供电压的电路中产生电脉冲信号；②在介质中产生功率损耗；③在紫外可见光波段直至无线电频率范围内有电磁辐射；④产生声辐射；⑤材料受放电作用后的化学变化。局部放电试验的主要目的是发现绝缘内部潜在的缺陷，可作为产品的型式试验、出厂试验、现场验收试验以及运行中的预防性试验的一个项目。该试验施加的电压通常低于绝缘的耐受水平，是一种非破坏性试验。针对不同的放电效应有不同的试验方法，比较常用的有电测法和声测法两种。

电测法 对局部放电引起的电脉冲或介质损耗进行测量，以测量电脉冲更为常用。电脉冲测量有直接测量和平衡测量两种基本电路：①直接测量电路。电路检测阻抗与耦合电容器串联，局部放电脉冲电压的一部分加在检测阻抗上；或者检测阻抗与被试品相串联，被试品的放电脉冲电流通过检测阻抗向放大器提供脉冲信号。②平衡测量电路。可以采用桥式电路，将电路调整到对外界干扰信号有最好的平衡效果；也可以采用平衡输入单元，它没有调整能力，当某些参数性质相同时有理想的平衡效果。



检测阻抗也称作输入单元,是将局部放电的脉冲电压或电流转换成向放大器提供的脉冲电压信号的一个四端网络。它通常是由电阻、电容和电感组成的电路,其频率特性要与放大器相配合。

放大器频率范围的选用取决于被试品的性质、试验的目的、试验的环境条件及仪器设备条件等因素。宽频带测试能比较正确地反映放电脉冲的波形,但往往受外界干扰影响较大。窄频带测试可以躲开某些强烈的外部干扰(如无线电广播的干扰),宜于在工厂或户外现场的条件下使用,但是它对脉冲波形能造成很大的畸变,当脉冲重复率较高或被试品内有行波的折射、反射过程时,会出现因脉冲叠加的相位不同而引起的信号抵消现象。

局部放电测试仪通常不能直接得出视在放电量的数值,要用已知大小的脉冲注入测试回路来模拟局部放电,求得回路的灵敏度。注入脉冲取自方波发生器与电容器相串联的校准装置,接到被试品的两端。校准通常在不加试验电压时进行,用校准脉冲的高度与实际施加电压时放电脉冲的高度相比较,便可得出被试品的视在放电量。

声测法 对局部放电产生的压力波进行探测。在超声波频段内进行探测称为超声波探测法。它是用超声传感器将声波转换成电信号,经放大后进行检测。可以利用声波传播的方向性作定位探测,也可利用声波脉冲和电信号脉冲之间的时延来求出放电源到声探头之间的距离,经多点测定,计算出放电点的位置。

局部放电试验受环境干扰的影响很大,减小背景干扰水平是提高测量能力的主要措施。试验时应采取实验室的屏蔽、试验回路的接地、试验电源的滤波以及消除高压引线和端子的电晕等措施。

局部放电试验已成为绝缘试验的重要项目。国际电工委员会(IEC)和中国国家标准对局部放电试验都有专门的规定。各种产品的局部放电试验方法和允许放电水平分别由产品的标准作出具体规定。对局部放电试验有待进一步研究的课题有:对放电参量的全面评价及数据处理;在干扰环境下提高测量的灵敏度;对运行中的设备进行局部放电在线监测等。

参考书目  
葛景涛,邱昌容,谢恒堃编,局部放电测量,北京:机械工业出版社,1984

(王乃庆)

juluyixi dianlan  
**聚氯乙烯电缆** (polyvinyl chloride insulated cable) 用聚氯乙烯聚合材料作为绝缘和护套的一种固体挤压聚合电缆,简称PVC电缆。主要用于电

压在6kV级及以下的低压电力电缆线路中。

聚氯乙烯具有较高的化学稳定性,即耐油、耐酸、耐碱、耐腐蚀,并属非延燃性材料。用聚氯乙烯作为电缆绝缘,价格比其它绝缘低廉,敷设运行简便,接头和终端简单,受潮气影响小,因此适用性广。它的缺点是一旦燃烧,会释放出氯气,不但对人体有害,且游离的氯原子会与氢结合形成盐酸,严重腐蚀邻近其它电气设备。在安全要求较高的场所,通常要将聚氯乙烯电缆穿在管子中。

由于聚氯乙烯的介质损耗较大,因此很少制成电压高于6kV的聚氯乙烯电缆。但聚氯乙烯的抗电离性能较好,允许局部放电量不超过40pC。聚氯乙烯属于热塑性高分子材料,温度较高时呈塑性,温度较低时呈脆性,因此规定聚氯乙烯电缆的长期允许工作温度不超过70℃,短路时的导体最高温度不超过160℃。

早在二次大战末期,聚氯乙烯就取代了橡胶作为电缆的绝缘,在20世纪50年代后期欧洲开始使用。由于电力电缆的通用性广,目前聚氯乙烯电缆在较低电压范围内实际上已取代了油浸纸绝缘电缆。由于聚氯乙烯的原材料价格低廉,正在开发改性聚氯乙烯,以降低其介质损耗,使它能适用于10kV级的电力电缆。

参考书目  
刘子玉,电气绝缘结构设计原理,北京:机械工业出版社,1981  
McAllister D. Electric Cables Handbook, Granada Publishing Limited, 1982

(桑纪明)

juyixi dianlan  
**聚乙烯电缆** (polyethylene insulated cable) 用聚乙烯聚合材料作为绝缘的一种固体挤压聚合电缆,简称PE电缆。聚乙烯电缆可用在各种电压等级的电力电缆线路中。

常用的聚乙烯电缆具有电气强度高,绝缘电阻系数大,介质损耗因数小,比重轻,耐湿性和工艺性能好,容易加工等优点。其缺点是熔点低,耐热性差,抗电晕性能不及聚氯乙烯电缆,因此规定了聚乙烯电缆的局部放电量不超过20pC。聚乙烯属热塑性高分子材料,在温度较高时呈塑性,易产生塑性变形,因此规定了聚乙烯电缆的长期允许工作温度不超过70℃,允许过载温度为80℃,短路时的导体最高温度不超过160℃。

为了改善聚乙烯电缆的抗电晕性能,在聚乙烯材料中添加不同的电压稳定剂,使允许最大工作场强得到提高,从而适用于更高的电压等级。较高电压等级有

金属套的聚乙烯电缆,在法国取得了较成熟的经验。法国于 1962 年投运了 63 kV 聚乙烯电缆,1969 年投运了 225 kV 聚乙烯电缆,1986 年又投运了 8 km 长的 400 kV 聚乙烯电缆。为了提高聚乙烯电缆的工作温度,近年来又发展了高密度聚乙烯电缆,因此常用的聚乙烯电缆相对地称为低密度聚乙烯电缆,但在多数国家则发展交联聚乙烯电缆。

(秦纪明)

jueyuan daoxian

**绝缘导线** (covered conductor) 一种以耐候型绝缘材料作外包绝缘的用于户外架空敷设的导线。耐候型绝缘材料一般采用耐候型聚氯乙烯、聚乙烯或交联聚乙烯等。按导线结构分,有单芯的、三芯或多芯互绞成束的两种,以后者应用较多,并称之为架空成束导线 (aerial bundle conductor, ABC)。按电压等级分,有低压的 (500V)、中压的 (10kV) 和高压的 (35kV) 三种,以低压的应用最普遍。为了保证架空线路全线的良好绝缘性能,绝缘导线的安装金具和各类接续件也都采用以绝缘材料包裹的绝缘金具。

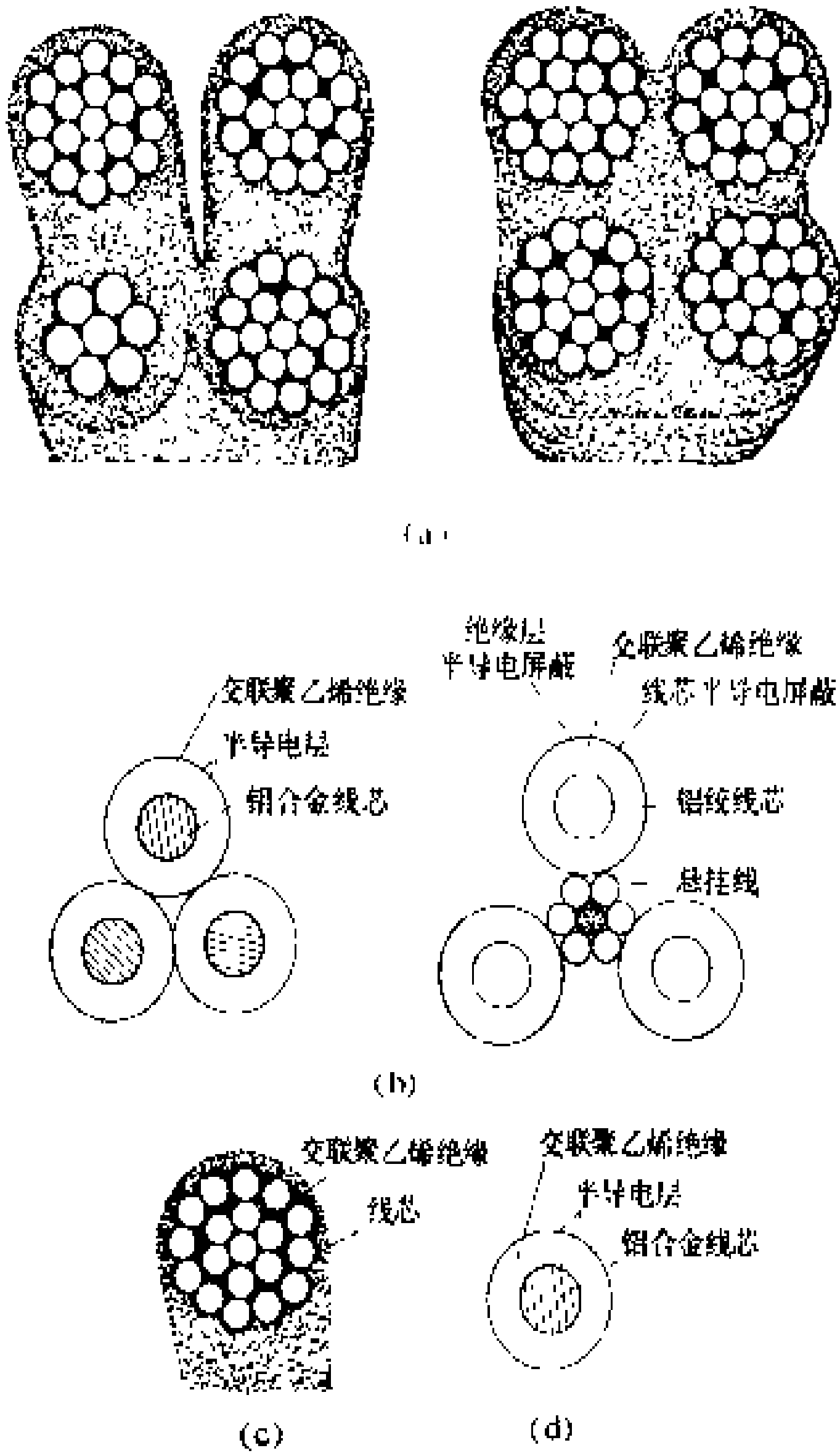
**特征** 绝缘导线的结构如图所示。低压绝缘导线的绝缘层外面不设护套,中、高压绝缘导线的绝缘内、外侧都有一层半导体层,但亦不设金属屏蔽层或外护套。不论是低压还是中、高压绝缘导线,都是以黑色耐候型交联聚乙烯作绝缘,但低压绝缘导线亦有以耐候型聚氯乙烯或聚乙烯作绝缘的。由于绝缘导线主要用于架空敷设,线芯一般采用紧压的硬铜或硬铝线芯。由于绝缘导线的结构,在绝缘导线有电时,虽然偶然触摸对人体是安全的,但规定带电的绝缘导线不允许人员直接触摸。同理,外物跌落在绝缘导线上不致引起短路事故,但不允许外物长期碰触或搁置在绝缘导线上。因此,虽然带电的绝缘导线坠地后仍能继续供电,但还是强调要及时处理,恢复正常安装状态。

绝缘导线与户内布线用的塑料线(即户内布电线)的主要差别在于:①户内布电线的绝缘对于抗日光和气候环境老化无特殊要求,因此用于户外时其绝缘极易老化脆裂;②户内布线线芯选用的是软铜线或软铝线,不适宜用于大档距架空敷设。

绝缘导线又与架空电缆不同,它们的主要差别是:架空电缆有金属外屏蔽层和护套,允许与地电位物体长期接触,也允许人员触摸其外皮,而成束绝缘导线包括一根承力用的悬挂线,架设时都要与地绝缘并有一定范围的小走廊区,一般架设在电杆上。

**开发与应用** 20 世纪 60 年代,一些工业发达国家开始发展绝缘导线,最初用于近郊或郊区穿越树林的配电线路上,逐步发展到将架空成束导线以沿墙敷

设的方式用于城市配电线路。日本、法国等一些国家还规定低压架空配电线路和城市的中压架空配电线路一定要使用绝缘导线。中国自 80 年代后期,在东北、华北地区开始逐步使用绝缘导线代替原来的低压架空配电线路上的裸导线。在华东、东北地区,还引进国外中压绝缘导线建设城市中压配电线路。与绝缘导线配套的绝缘金具也相继得到开发。目前,中国各供电部门都将逐步采用绝缘导线代替架空配电线路上的裸导线。



各种电压等级的绝缘导线结构

- (a) 低压架空成束导线; (b) 高压架空成束导线;  
(c) 低压单芯绝缘导线; (d) 中压单芯绝缘导线

采用绝缘导线架设的线路与用裸导线架设的线路相比,其优点是:①提高线路安全供电的可靠性。绝缘导线的线路可以防止外物引起的相间短路,减少合杆线路作业时的停电次数,减少维修工作量,提高了线路的供电利用率。在法国,绝缘导线线路的事故率为裸导线线路事故率的 1/6,在日本为 1/2。②有利于城市绿化,减少线路沿线树木的修剪量。③可以简化线路杆塔结构,甚至可沿墙敷设,既节约了线路材料,又美化了城市街道。④节约了架空线路所占用的空间,便于架空线路在狭小通道内穿越。⑤节约线路电能损失,降低电压损失,特别是架空成束绝缘导线,由于其线间距离极小,线路电抗仅为普通裸导线线路电抗的 1/3。⑥由于线路技术状况的提高,减少了维修工作量,延长了检修周期,减少了因检修而停电的时间。⑦减少了导线腐

蚀, 延长了线路使用寿命。绝缘导线虽然有诸多优点, 但单位造价高于裸导线, 中压线路约高出一倍, 低压线路约高出 25%。

展望 绝缘导线用于架空线路具有许多优点, 虽然新建时的投资略高, 但从长远看, 在城市 35kV 及以下的配电网中逐步使用绝缘导线已为各国供电部门所肯定。随着绝缘材料国产化, 配套绝缘金具和接续件的完善, 中国亦将推广应用交联聚乙烯绝缘的中、低压绝缘导线, 并逐步扩大其使用范围。

(陈效杰)

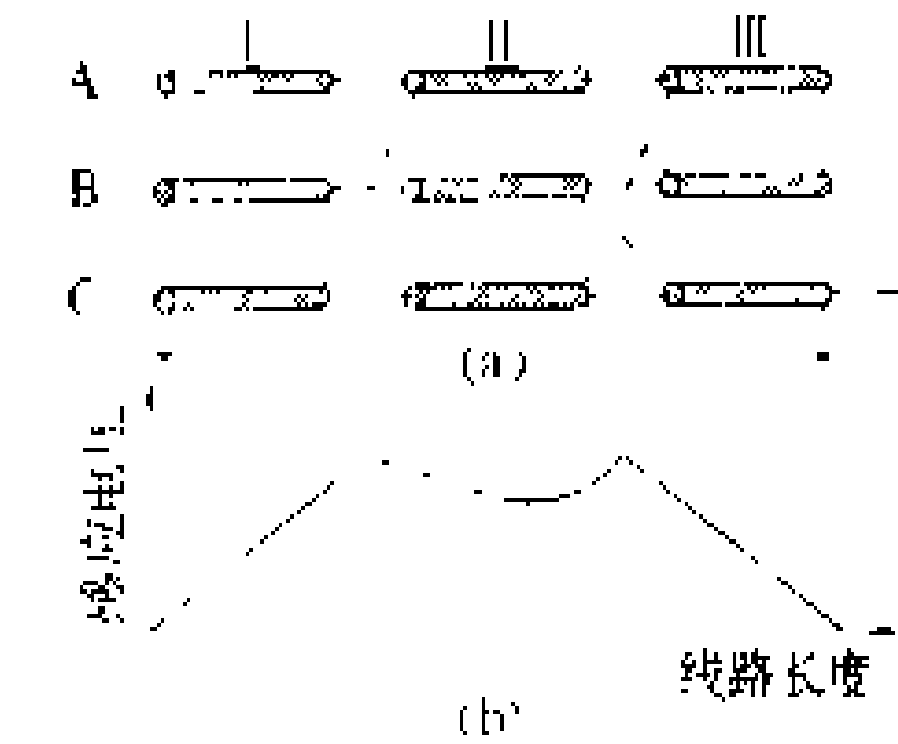
jueyuan dianlan jietou

绝缘电缆接头 (insulating cable joint)

用绝缘隔板夹在接头壳体中间, 使壳体、电缆金属外屏蔽层两侧之间绝缘以及壳体对地绝缘的电缆接头。用在单芯电缆护层交叉互联的电缆线路中。用单芯电缆组成的电缆线路, 在金属套上都感应有纵向电动势, 如将线路两侧的金属套接地, 纵向电动势短路后形成循环电流, 这不仅增加了线路损耗, 且减少了电缆的输送容量。如只将线路的一侧金属套接地, 则另一侧的金属套对地电压, 既对人身不安全, 又对设备有危害。绝缘接头是将全长电缆线路金属套的感应电压分割成多段, 使每段的电压限制在不影响人身和设备的安全值内。由于绝缘电缆接头和直线电缆接头所用的材料基本相同, 如果将绝缘电缆接头两侧壳体用导线短接, 即成直线电缆接头。因此在实际使用中常用绝缘电缆接头代替直线电缆接头。

交叉互联 将一相绝缘接头一侧的金属套和另一

相绝缘接头的另一侧金属套相互联接的方法, 用在较长的电缆线路中, 如图 (a) 所示。第 I 段 A 相金属套的感应电压与第 II 段 B 相金属套和第 III 段 C 相金属套的感应电压的相角相互间差了 120°, 它们的合成电压接近于零,



避免了增加线路损耗的护套循环电流, 沿线电压分布情况如图 (b) 所示。

用绝缘电缆接头和护套交叉互联的方法, 可以提高电缆线路的输送容量 (对铅套电缆线路可提高 15%~50%, 对铝套电缆线路可提高 25%~80%)。但由于绝缘电缆接头结构比较复杂和需要增加护层保护器等费用, 一般认为导体截面大于 630 mm<sup>2</sup> 时才经济适

用。(见电缆线路设计)

护层保护器 防止绝缘电缆接头隔板在过电压时发生击穿的保护器, 用在护套交叉互联、单点互联和连续互联的电缆线路中, 用残压低、工频强度高的非线性材料 (如碳化硅、氧化锌阀片等) 做成, 也可用球间隙代替, 但由于球间隙放电后维修工作量大, 已逐渐被淘汰。

护层保护器和绝缘电缆接头间的连接可以采用三角形或星形接法。三角形接法的保护器的两端要求都对地绝缘, 因此体积较大。星形接法的保护器由于不均匀分担被保护的绝缘隔板的过电压, 因此要增强保护器的绝缘。

同轴引线 内、外双芯成同心圆形导体并各有绝缘的一种同轴电缆。用作绝缘接头和护层保护器开关箱间的连接线。同轴引线的内芯连接绝缘接头隔板一侧的壳体, 外芯连接隔板的另一侧壳体。为了减小至护层保护器间连接线的波阻抗, 同轴引线的长度不宜大于 3 m。由于引线在系统接地故障时通过接地电流, 内外芯导体的截面需满足接地故障时的热稳定要求, 通常各为 120 mm<sup>2</sup>。

参考书目

Bungay E M G, McAllister D. Electric Cables Handbook. BSP Professional Books, 1990

(李贻荪)

jueyuan dianzu celiang

绝缘电阻测量 (insulation resistance measurement)

对一个绝缘结构或绝缘材料试样在直流电压下呈现的高电阻值进行测量, 是判断绝缘状况的最基本、最方便的手段。

任何绝缘材料和绝缘结构在直流电场作用下都会因载流子的定向运动形成微小的电流, 即表现为阻值很高的电阻。绝缘材料的电阻值越高, 说明绝缘性能越好。当绝缘中有贯穿性缺陷或受潮时, 绝缘电阻值会显著降低, 甚至丧失其绝缘性能。

由双层或多层电介质构成的绝缘, 在开始施加直流电压时, 电场按介质的介电常数分布, 经一段时间后到达稳态, 变为按电导率分布。这个过渡过程称为吸收过程, 用吸收比来表征, 即 60 s 和 15 s 时测得的绝缘电阻的比值。对吸收过程较长的设备, 也用极化指数来表征吸收过程, 它是 10 min 和 1 min 绝缘电阻的比值。吸收比或极化指数的降低说明绝缘可能受潮。

绝缘电阻的测量方法是用仪表直接测量或对被测端子两端施加直流高压, 测量电压和电流的比值 (见直流电压试验)。绝缘电阻通常用兆欧姆 (MΩ) 或吉

欧姆 (GΩ) 为计量单位。常用的测量绝缘电阻的仪表是兆欧表。传统的兆欧表用手摇发电机产生直流高压, 俗称摇表, 它的表头线圈有特殊构造使指针直接指示电压和电流的比值。现代的兆欧表用晶体管线路发生直流高压并测量通过绝缘的微电流。在实验室中对  $10^{14} \sim 10^{18} \Omega$  的高绝缘电阻试样测量须用高阻计, 它的主要部分是一台灵敏度很高的直流微电流放大器。

参考书目

刘耀南, 邱昌容编, 电气绝缘测试技术, 北京: 机械工业出版社, 1981

(王乃庆)

jueyuan peihe

**绝缘配合** (insulation co-ordination) 在三相交流电力系统中, 综合考虑系统中出现的各种作用电压、过电压限制装置和措施的特性以及绝缘的性能, 恰当地选择线路和输配电设备应具有的绝缘水平, 并选定相应的试验类型和试验方法。绝缘配合的原则由技术经济比较确定。提高绝缘水平将使线路和设备的投资加大。降低绝缘水平则会增大保护设备的投资, 也会增大线路和设备的停电事故率和绝缘故障率。

输电线路的绝缘配合, 主要是根据正常运行条件下的工频电压决定绝缘子链的长度 (或绝缘子片数), 同时根据工频电压、雷电过电压和操作过电压来综合选定导线至接地部分的空气距离。(见线路绝缘水平)

输配电设备的绝缘配合, 则主要是根据工频过电压、预期操作过电压倍数和避雷器残压来确定电气设备的绝缘水平。(见电气设备绝缘水平)

常用的绝缘配合的方法有: 绝缘配合惯用法 (确定性方法)、绝缘配合简化统计法及绝缘配合统计法。

(王秉钧)

jueyuan peihe guanyongfa

**绝缘配合惯用法** (conventional method for insulation co-ordination) 要求绝缘能耐受各种作用电压而不发生闪络或击穿事故的惯用配合方法。作用电压是指一定代表性波形和最大预期幅值  $U_m$  的雷电过电压、操作过电压以及与操作过电压相对应的工频电压。绝缘耐受电压的能力 (见绝缘水平) 可用耐受电压  $U_w$  表示,  $U_w = KU_m$ , 其中  $K$  称为间隔系数。考虑到估算过电压幅值的某些不确定因素、设备绝缘的老化以及外绝缘所处的非标准大气条件,  $U_w$  应大于  $U_m$ , 即  $K > 1$ 。由于  $U_m$  和  $K$  均取某一简单的定值, 故这一方法又称为绝缘配合的确定性方法。(见全波冲击绝缘水平、截波冲击绝缘水平、操作冲击绝缘水平及

工频耐受电压)

对于电气设备的内绝缘, 由于无法得到充分可靠的放电概率特性, 均采用惯用法来进行绝缘配合。对于较低电压等级的电气设备, 绝缘水平的高低对经济的影响并不突出, 故其内、外绝缘都采用惯用法进行绝缘配合。在中国, 各级电压的线路和输配电设备的绝缘配合均采用惯用法。

(王秉钧)

jueyuan peihe jianhua tongjifa

**绝缘配合简化统计法** (simplified statistical method for insulation co-ordination) 在绝缘配合统计法的基础上作了下列简化规定后, 计算出绝缘的故障率  $R$ , 作为定量的设计指标。

(1) 规定遵从标准化正态分布的随机变量  $t$  的概率密度函数  $\varphi(t)$ 、分布函数  $\Phi(t)$  分别为

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$$
$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

(2) 规定作用于绝缘的过电压遵从数学期望为  $\mu_p$ 、标准偏差为  $\sigma_p$  的正态分布。此时过电压幅值为  $u$  时的概率密度函数值  $f_p(u)$  和分布函数值  $F_p(u)$  分别为

$$f_p(u) = \frac{1}{\sigma_p} \varphi(t)$$
$$F_p(u) = \Phi(t)$$

式中  $t = \frac{u - \mu_p}{\sigma_p}$ 。由于过电压的数据数是有限的, 可取其算术平均值  $\bar{\mu}_p$  作为  $\mu_p$  的估算值。

(3) 规定直至放电概率很小时, 单组绝缘在过电压  $u$  下的放电概率  $P(u)$  可由下式估算

$$P(u) = \Phi\left(\frac{u - \mu_i}{\sigma_i}\right)$$

式中  $\mu_i$ 、 $\sigma_i$  是与  $\mu_p$ 、 $\sigma_p$  性质类似的绝缘放电电压中的有关参数。可用试验数较多时求得的放电概率为 50% 的放电电压  $u_{50\%}$  作为  $\mu_i$  的估计值。

(4) 规定  $\frac{\sigma_p}{\mu_p}$ 、 $\frac{\sigma_i}{\mu_i}$  为定值。令  $c_p = \frac{\sigma_p}{\mu_p}$ , 其值与过电压的性质 (雷电过电压或操作过电压) 和类型 (分闸、合闸) 有关, 雷电过电压时  $c_p$  可高达 0.4~0.6, 操作过电压时为 0.1~0.2。令  $c_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \approx \frac{\sigma_i}{u_{50\%}}$ , 则操作、雷电冲击时  $c_i$  分别为 0.06 和 0.03 (如考虑到一些影响因素随时间作周期性变化,  $c_i$  分别取 0.08 和 0.05)。

在上述四个规定条件下, 单组绝缘的故障率  $R$  可



由下式计算

$$R = \Phi\left(\frac{\mu_p - \mu_i}{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_i^2}}\right) \approx \Phi\left(\frac{\bar{\mu}_p - u_{50\%}}{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_i^2}}\right)$$

由于  $c_p$  和  $c_i$  为定值, 为更便于实际应用, 可改用特定概率的过电压与放电电压来计算故障率  $R$ 。求得累积概率为 2% [即  $P(u > \mu_{p,2}) = 0.02$ ] 的统计过电压  $\mu_{p,2} = \mu_p + 2.05\sigma_p \approx \bar{\mu}_p (1 + 2.05c_p)$ , 放电概率为 10% [即  $P(u = \mu_{i,10}) = 0.1$ ] 或耐受概率为 90% 的统计冲击耐受电压  $\mu_{i,10} = \mu_i - 1.28\sigma_i \approx u_{50\%} (1 - 1.28c_i)$ , 令  $\gamma = \frac{\mu_{p,2}}{\mu_{i,10}}$  为统计安全裕度系数, 选定  $\gamma$ , 即可计算  $R$  值。例如当  $c_p = 0.1$ ,  $c_i = 0.08$  时,  $\gamma = 1.0$  与  $\gamma = 1.15$  时的  $R$  值分别为  $\Phi(-2.334) = 9.8 \times 10^{-3}$  与  $\Phi(-3.422) = 3.13 \times 10^{-4}$ 。

当作用于绝缘的过电压的分布规律与正态分布相差很多时, 可利用正态分布函数表, 按下式进行近似计算

$$R \approx \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^k n_j \left[ \Phi\left(\frac{u_j - \mu_i}{\sigma_i}\right) + \Phi\left(\frac{u_{j+1} - \mu_i}{\sigma_i}\right) \right]$$

式中  $n_j$  为过电压位于  $(u_{j+1} \sim u_j)$  组距内的数据个数;  $k$  为过电压值的分组数;  $N$  为过电压数据的总数,  $N = \sum_{j=1}^k n_j$ 。

对于需要计算  $n$  组相同的绝缘在同一过电压作用下的故障率  $R_n$  的问题, 虽已进行了不少研究工作, 但由于基础数据的准确度不高, 尚不可能对  $R_n$  进行准确的计算。当  $n$  较大时, 通常近似地认为  $R_n \approx nR$ 。

本方法方便实用, 但仅适用于外绝缘或自恢复绝缘。

(王秉钧)

jueyuan peihe tongjifa

**绝缘配合统计法** (statistical method for insulation co-ordination) 全面地考虑作用电压、绝缘放电 (或耐受) 特性、影响因素的随机特性 (概率分布规律) 进行绝缘配合的方法。绝缘配合统计法以绝缘的故障率  $R$  作为绝缘配合的指标, 只适用于外绝缘 (或自恢复绝缘) 的绝缘配合。

各类过电压的幅值、波形参数 (波头持续时间、波前部分上升的陡度等) 都是随机的, 绝缘的放电概率既与作用电压的幅值和极性有关, 还与电压波形有关。对绝缘放电电压有影响的一些因素, 如污秽、降水量、风速 (或风偏角)、大气条件等, 都具有一定的统计性。为了进行统计配合, 需要掌握所有上述统计数据。由于考虑的因素较多, 对故障率  $R$  只能进行数值计算。为便

于实用, 必要时可用简化统计法代替。

(王秉钧)

jueyuan shouming shiyan

**绝缘寿命试验** (insulation life test) 采用人工加速老化的方法确定绝缘使用寿命的试验。影响绝缘寿命的因素很多, 如电场强度、温度、机械应力、光辐射、化学反应等。绝缘寿命试验通常是针对某种主要作用因素而言的, 如电老化试验是检验材料耐局部放电的能力, 而热老化试验是检验材料的耐热性能等。

加速老化是将某老化因素人为地增强, 使绝缘在比正常老化时间短的情况下出现预期的老化结果, 从而能在较短时间里考验材料长时间的老化特性。由加速老化试验结果, 再根据经验公式或由老化机制建立的物理模型, 可以用来预测在正常条件下或者某特定条件下的绝缘寿命。

人工加速老化必须考虑以下四个因素:

(1) 老化因子的选择。根据要求考核的对象和实际工作条件来决定。例如电老化试验中, 根据电老化寿命关系式  $L = K/E^n$  ( $L$  为场强  $E$  下考核对象的寿命,  $K$  和  $n$  为常数), 选择  $E$  为加速老化的因子。热老化试验中根据热寿命关系式  $\lg \tau = a + b/T$  ( $\tau$  为温度  $T$  时的寿命,  $a$  和  $b$  为常数), 选择温度  $T$  作为加速老化的因子。试验过程中, 对老化的加速程度既要尽可能保持老化机理不变, 又要使试验时间不致于太长。例如热老化试验规定最高试验温度下老化寿命不小于 100 h, 最低试验温度下不小于 5000 h。

(2) 寿终标准的确定。要选择绝缘材料在运行中承担的主要功用所要求的性能指标来评定老化程度, 并以这些性能的最低要求作为寿终标准。

(3) 试样的形式和数量。如用模型或试样进行试验, 应使模型或试样尽可能接近实际结构。考虑到试验的分散性, 试样的数量的选择要符合抽样统计的原则。

(4) 数据处理。用适当的统计法处理试验结果。

传统的绝缘寿命试验时间长, 所需试样量大, 加速老化因子对老化的作用不易确定。新的发展趋势是把先进的分析方法 (例如差热分析法、质谱分析法、色谱分析法、光谱分析法等) 用于老化过程的分析, 从而对老化寿命作出快速评定, 并对老化机理作出解释。多重作用因子的绝缘老化试验也是新的研究方向。

参考书目

刘耀南, 邱昌容编, 电气绝缘测试技术, 北京: 机械工业出版社, 1981

(王乃庆)





jueyuan shuiping

**绝缘水平** (insulation level) 绝缘耐受电压的能力。

架空输电线路的绝缘水平可表现为绝缘子的类型及片数、对接地部分的间隙距离和相间距离,也可以不同类型的电压(工频电压、雷电过电压、操作过电压)作用下、不同表面状态(干燥或淋雨)时放电电压的算术平均值(50%放电电压 $U_{50\%}$ )、标准偏差 $\sigma_1$ 或相对标准偏差 $c_1 = \frac{\sigma_1}{U_{50\%}}$ 表示。(见线路绝缘水平)

电气设备的绝缘水平用给定波形下绝缘应耐受的电压表示。它们是:额定短时工频耐受电压、额定雷电冲击耐受电压和额定操作冲击耐受电压。对额定电压为220 kV及以下的电气设备,通常只要求工频和冲击耐受电压。(见电气设备绝缘水平)

绝缘水平可根据绝缘特性及作用于绝缘上的工频电压、过电压,按设备和线路的造价、运行维护费用以及事故损失综合考虑后确定。

(王秉钧)

jueyuanzi

**绝缘子** (insulator) 由固体绝缘材料为主制成的,安装在不同电位的导体或导体与接地构件之间,能够耐受电压和机械应力作用的部件。绝缘子种类繁多,形状各异。不同类型绝缘子的结构和外形虽有较大差别,但都是由绝缘本体和连接金具两大部分组成的。

**分类** 绝缘子按照安装方式不同,可分为悬式绝缘子和支柱绝缘子两大类;按照使用的绝缘材料不同,可分为瓷绝缘子、玻璃绝缘子和合成绝缘子;按照使用电压等级不同,又可分为低压绝缘子和高压绝缘子。此外,按照使用的环境条件的不同,又派生出一些特殊类型的绝缘子,如在污秽地区使用的耐污绝缘子。尚有各种特殊用途的绝缘子,如绝缘横担、拉紧绝缘子、线轴绝缘子和布线绝缘子等。

**悬式绝缘子** 广泛应用于高压架空输电线路和母线的绝缘及机械固定。在悬式绝缘子中,又可分为盘形悬式绝缘子和棒形悬式绝缘子。盘形悬式绝缘子是输电线路使用最广泛的一种绝缘子。棒形悬式绝缘子在德国等国家已大量采用。

**支柱绝缘子** 主要用于发电厂及变电所的母线和电气设备的绝缘及机械固定。此外,支柱绝缘子常作为

隔离开关和断路器等电气设备的组成部件。在支柱绝缘子中,又可分为针式支柱绝缘子和棒形支柱绝缘子。针式支柱绝缘子多用于低压配电线路和通信线路,棒形支柱绝缘子多用于高压变电所。

**瓷绝缘子** 绝缘件由电工陶瓷制成的绝缘子。电工陶瓷由石英、长石和粘土作原料烘焙而成。瓷绝缘子的瓷件表面通常以瓷釉覆盖,以提高其机械强度,增加表面光滑度。在各类绝缘子中,瓷绝缘子使用最为普遍。

**玻璃绝缘子** 绝缘件由经过钢化处理的玻璃制成的绝缘子。其表面处于压缩预应力状态,如发生裂纹或电击穿,玻璃绝缘子将自行破裂成小碎块。这一特性有利于发现零值绝缘子。

**合成绝缘子** 绝缘件由环氧玻璃钢的芯棒与有机材料的护套和伞裙组成的绝缘子。其特点是重量很轻,抗污秽闪络性能优良,抗拉强度高。但抗老化能力不如瓷和玻璃绝缘子。

**低压绝缘子和高压绝缘子** 低压绝缘子是指用于低压配电线路和通信线路的绝缘子。高压绝缘子是指用于高压、超高压架空输电线路和变电所的绝缘子。为了适应不同电压等级的需要,通常用不同数量的同类型的单只(件)绝缘子组成绝缘子串或多节的绝缘支柱。

**耐污绝缘子** 通常是采取增加或加大绝缘子伞裙或伞棱的措施以增加绝缘子的爬电距离,提高绝缘子污秽状态下的电气强度。耐污绝缘子的爬电比距一般要比普通绝缘子提高20%~30%。

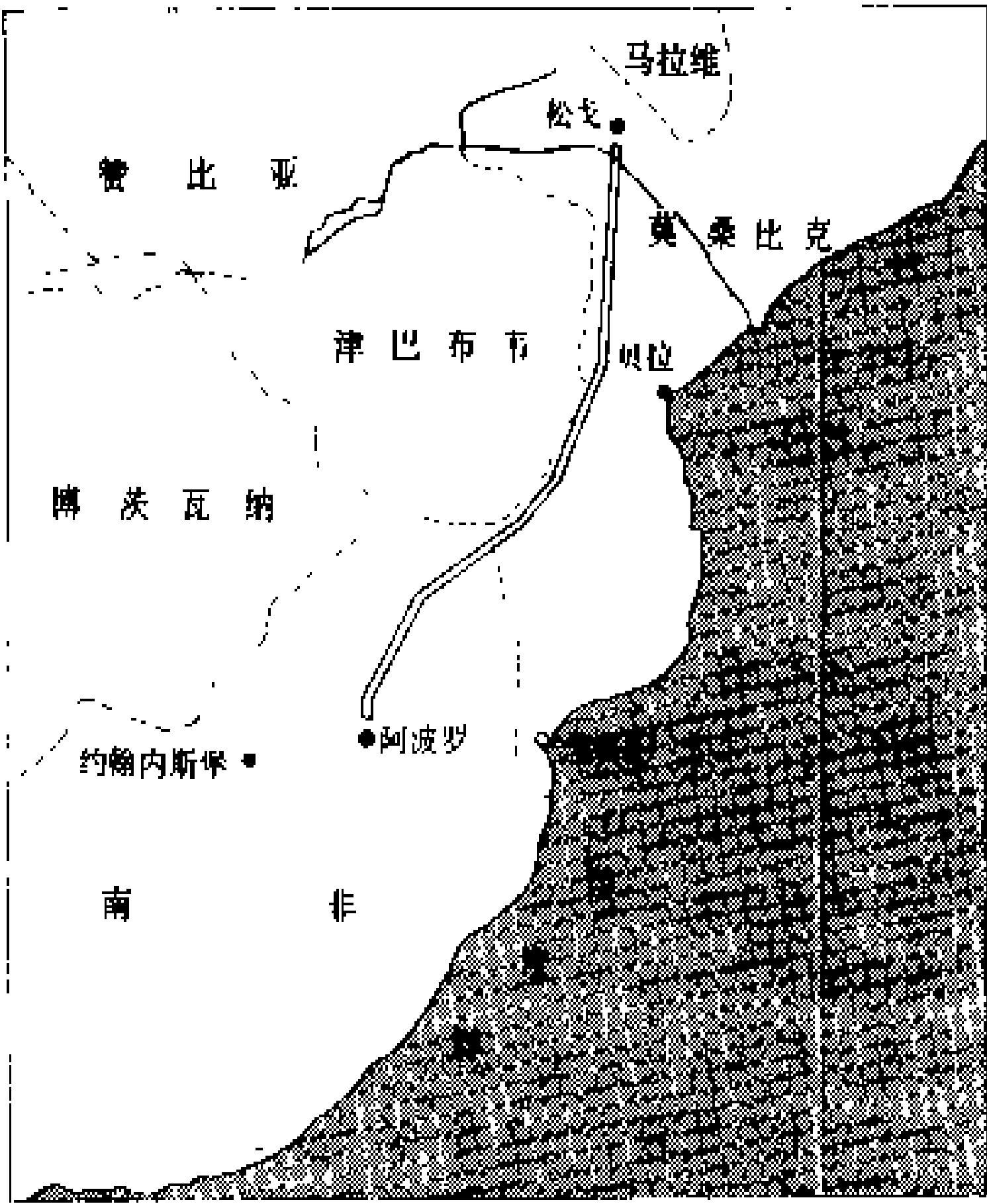
**功能及要求** 绝缘子的主要功能是实现电气绝缘和机械固定,为此规定有各种电气和机械性能的要求。如在规定的运行电压、雷电过电压及内部过电压作用下,不发生击穿或沿表面闪络;在规定的长期和短时的机械负荷作用下,不产生破坏和损坏;在规定的机、电负荷和各种环境条件下长期运行以后,不产生明显的劣化;绝缘子的金具,在运行电压下不产生明显的电晕放电现象,以免干扰无线电或电视的接收。因为绝缘子是大量使用的部件,对其连接金具还要求其具有互换性。此外,绝缘子的技术标准还根据型号和使用条件的不同,要求对绝缘子进行各种电气的、机械的、冷热的以及环境条件变化的试验,以检验其性能和质量。

参见彩图插页第7页25图。

(郑健超)

# K

Kabula Basa zhiliu shudian gongcheng  
**卡布拉巴萨直流输电工程** (Cabora Bassa DC transmission project) 建设本工程的主要目的是将莫桑比克的松戈 (Songo) 的电力输送到南非约翰内斯堡附近的阿波罗 (Apollo)。本工程是按用电负荷的增长情况分三个阶段进行建设的, 于 1979 年全部完工。最终的输电电压为  $\pm 533$  kV, 输送功率 1920 MW, 额定电流 1800 A。其地理位置如图所示。



卡布拉巴萨直流输电工程的地理位置图

本工程采用晶闸管阀。晶闸管元件额定参数为 2.4 kV, 900 A; 每台桥阀有两串元件并联, 每串有 96 只元件; 阀元件既串联又并联是工程所用换流阀的一个特点。每极四桥, 制成两重阀型式; 出于对当地地理条件的考虑, 换流阀采用了户外油箱式结构, 用油作为绝缘与冷却介质。

本工程在投运初期没有装设直流滤波器, 只在两端换流站直流侧装设电容量为  $0.1 \mu\text{F}$  的换流站冲击波吸收电容器, 后来才扩展成直流滤波电路。533 kV 平波电抗器在 1800 A 时的电感为 0.83 H。

两端换流站均装有交流滤波器, 其中松戈换流站的无功总容量为 420 Mvar, 阿波罗站的无功总容量为 390 Mvar。此外, 在阿波罗站中还装有无功补偿电容器组, 总容量约 600 Mvar。

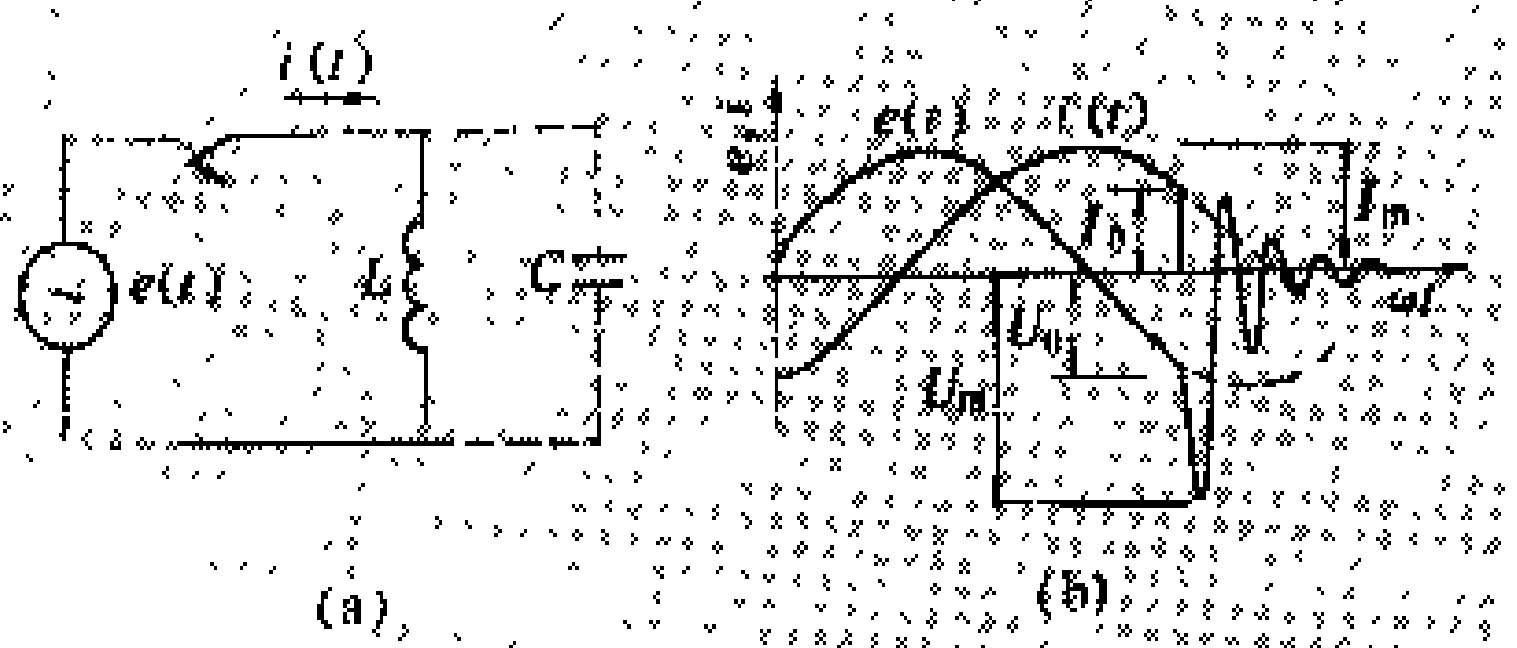
架空线路全长 1414 km, 为了提高线路的耐雷性能, 采用彼此相距若干距离的两条单极直流架空线的结构, 即两极的导线分杆架设。所采用的分裂导线为  $4 \times 565 \text{ mm}^2$  钢芯铝线; 绝缘子的爬电比距采用 2.3 ~ 2.7 cm/kV; 直流接地极埋设地点到换流站之间的距离分别为: 松戈侧 15 km, 阿波罗侧 7 km。

本工程于 1979 年全部建成。是户外油箱式晶闸管阀规模最大的工程, 而且成为当时世界上输电电压最高、输送功率最大的直流输电工程, 并以优越的技术经济指标, 标志着大功率、远距离直流输电进入一个新的发展阶段。

(任 震 赵智大)

kaiduan diangan fuzai guodianya

**开断电感负载过电压** (inductance switching-off overvoltage) 开断电感负载时由于电流在自然过零之前被强制截断导致暂态振荡所引起的过电压。它是操作过电压的一种。电感负载可以是空载或轻载的变压器和电动机, 以及消弧线圈等, 被开断的电流是不太大的励磁电流。在开断空载变压器时出现的过电压又称切空变过电压。



开断感性负载时的过电压

(a) 等值电路; (b) 波形示意

如图所示, 电感电流  $i(t)$  在  $I_0$  处被截断, 截流瞬间, 电感负载  $L$  中储有磁场能  $LI_0^2/2$ , 负载杂散电容  $C$  中储有电场能  $CU_0^2/2$ 。截流后, 这些能量将在  $LC$  回路中振荡, 在全部能量转化为电场能的瞬间, 电容上电压 (即电感线圈两端的电压) 将达最大值  $U_m = \sqrt{U_0^2 + I_0^2 L/C}$ 。如果电流在幅值  $I_m$  处被截断, 则过电压可达  $U_m = I_m \sqrt{L/C}$ 。因  $C$  值一般很小, 所以  $U_m$  有较高的值。开断电感负载过电压的最大能量为  $LI_m^2/2$ , 其绝对值不大 (在计及铁芯磁滞损耗后, 还可进一步减小), 可用阀式避雷器加以限制, 断路器断口的有限绝缘强度也会起到限制过电压的作用。

断路器开断小电流能力愈好, 产生高幅值开断电

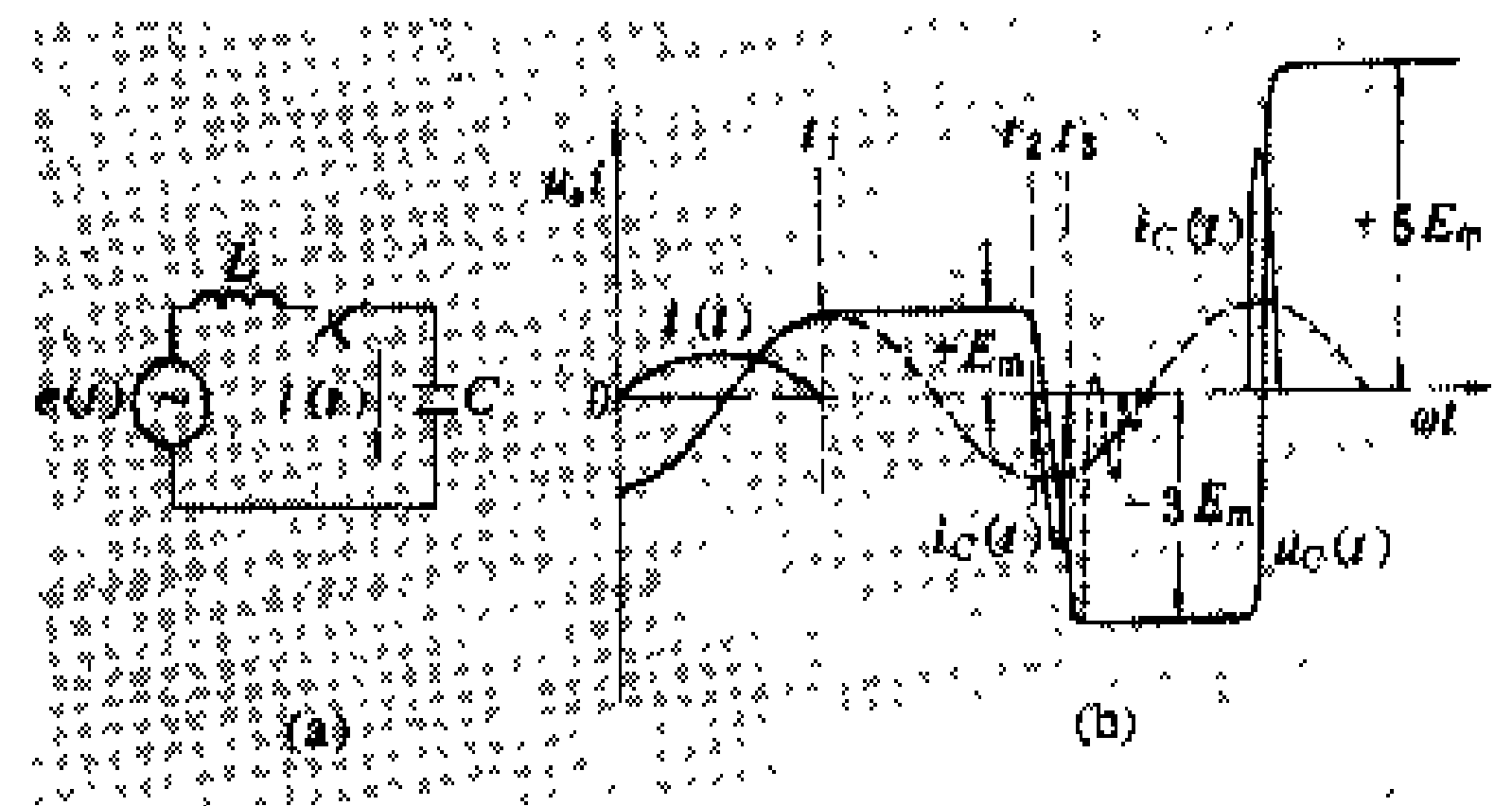
感负载过电压的概率越大。由于断路器灭弧过程的分散性,使开断电感负载过电压具有明显的统计性。减小电感线圈的励磁电流(例如采用冷轧硅钢片),增大与电感并联的电容 $C$ (例如在变压器中采用纠结式绕组),可降低开断电感负载过电压。

(方 瑜)

kaiduan dianrong fuzai guodiansha

**开断电容负载过电压** (capacitance switching-off overvoltage) 开断电容负载时由于断路器重燃导致暂态振荡引起的过渡过程过电压。它是操作过电压的一种。电容负载可以是集中的电容器组,也可以是分布参数的空载线路。开断空载长线时的过电压,又称切空线过电压。

如图(a)所示,在开断电容负载时开关 $K$ 在容性电流 $i(t)$ 自然过零时熄弧,使电容与电源分离[图(b)中的时刻 $t_1$ ],此时电容上的电压将维持在电源电动势 $e(t)$ 的幅值 $E_m$ ,经工频半周波后[图(b)中的时刻 $t_2$ ],电源电动势到达 $-E_m$ ,断路器触头间电压达 $2E_m$ ,可能发生第一次重燃。重燃后,电容上的电压 $u_C(t)$ 从 $E_m$ 过渡至 $-E_m$ 时,将发生角频率 $\omega=1/\sqrt{LC}$ 的高频振荡,同时伴随有高频电流 $i_C(t)$ 。当振荡电压达最大值 $-3E_m$ 时,高频电流第一次过零[图(b)中的 $t_3$ ],如果此时电弧熄灭, $u_C(t)$ 将维持在 $-3E_m$ 。再经工频半周波,当 $e(t)$ 为 $E_m$ ,触头间电压为 $4E_m$ 时,可能发生第二次重燃,使 $u_C(t)$ 从 $-3E_m$ 过渡至 $E_m$ ,振荡电压最大可达 $5E_m$ 。循此以往,直至断路器不重燃为止。实际上,受断路器断口绝缘恢复强度的限制和断路器熄弧、重燃的随机性,以及泄漏或各种损耗的存在,过电压将低于上述分析的数值。开断电容负载时过电压幅值及其出现的概率符合正态分布规律。



开断电容负载过电压的发展过程  
(a) 等值电路; (b) 波形示意

限制开断电容负载过电压的主要措施是:①提高断路器刚分时触头间的介质恢复强度,以避免重燃;②在断路器断口间并联千欧级的分闸电阻;③采用避雷器。

(方 瑜)

kaiduan yu guanhe shiyan

**开断与关合试验** (making and breaking tests) 考核高压开关设备在各种工作条件下的开断与关合能力的试验。高压开关设备应能在其技术条件规定的所有情况下开断与关合电路。开断与关合的过程非常复杂,难于计算,只能依靠试验进行研究与考核。开断与关合过程的主要参数是开断与关合电流、关合电压与开断后的恢复电压特性。

各种电气回路中的电流与瞬态恢复电压各不相同。根据操作电流的大小和回路性质的不同,可将各类操作方式分为:①大电流操作,有出线端短路(端部短路)、近区短路、失步、异相接地、发展性故障和并联开断六种;②电感性小电流操作,有开断与关合电动机、并联电抗器和空载变压器三种;③电容性电流操作,有开断与关合电容器组(单组的或多组并联的)、空载架空线和空载电缆三种。

近年来,除上述各种开断方式外,又增加了二次开断,是指小容量电力变压器二次侧短路,但二次侧断路器拒动,由一次侧断路器动作开断发生在二次侧的短路故障。这种情况下的开断电流接近断路器的临界电流。当变压器中性点接有电抗器时,在首开相灭弧后,如果其余两相出现截流,中性点电抗器释放出的能量将引起过电压。如果断路器不能胜任这种工况,将因不能灭弧导致事故。

此外,断路器能自激灭弧的电流下限值称为临界电流值,对具有临界电流值的断路器应进行临界电流的开断试验。

**出线端短路故障试验** 短路发生在开关设备出线端的端部,是开断、关合试验的基本方式和设备型式试验的主题内容(见大功率试验),并按此试验结果规定出开关设备的额定短路开断电流、额定瞬态恢复电压特性等基本参数。开关设备应能在各种开断电流值下直到额定短路开断电流下顺利地进行操作。

**近区短路故障试验** 距离断路器出线端数百米至数千米处发生的短路,即从断路器到短路点之间有一条架空短线。由于短线有一定的阻抗,近区短路电流小于出线端的短路电流,但开断近区故障却更为困难,特别是对于压缩空气式和 $SF_6$ 类断路器。因为在断路器的灭弧瞬间,储存在短线对地电容中的电能以接近于光速在短线上往返振荡,在短线的端部形成高频锯齿状电压波,从而在断路器断口间形成极高的恢复电压上升率(达 $10\text{ kV}/\mu\text{s}$ 或更高),致使断路器开断失败。国际电工委员会(IEC)规定:只有与架空线直接相连,额定短路开断电流大于 $12.5\text{ kA}$ ,额定电压为 $52\text{ kV}$ 及以上的断路器才需要进行近区故障试验(在中国相当于 $35\text{ kV}$ 及以上)。试验时的短线长度应将短路电流

限制到其额定值的 90% 和 75%，试验条件以单相短路为其代表。由于开断的困难来自高的恢复电压上升率，因此，每相的断口数越多，每个断口的负担就越小。超高压开关设备在其发展的初期每相断口数较多，能满足高恢复电压上升率的要求。但近年来，超高压断路器每相断口数越来越少，500 kV 级趋势是一个断口，因而近区故障试验显得更为重要。

**失步开断与关合试验** 处于两系统间联络线上的断路器，当两端的系统失步时，通过断路器的电流为系统间的振荡电流。当这一振荡电流被开断后，断口间的电压为两端系统的电压相量之差，并应计及地电流的影响。这种情况下，断路器上的瞬态恢复电压最高可达相电压的 3 倍（非有效接地系统）或 2.6 倍（有效接地系统）。IEC 规定的额定失步开断电流为额定短路开断电流值的 25%，其瞬态恢复电压工频分量为相电压的 2.5 倍（中性点不接地系统）或 2 倍（中性点直接接地系统）。这种电压高而电流不很大的条件可能使断路器难于开断。IEC 又规定，还应在额定失步开断电流的 20%~40% 下进行失步开断与关合试验。进行失步条件下的试验操作顺序是“分”与“合分”。

**异相接地试验** 中性点不接地的系统中的两相上出现两点接地时，如果一相的接地点处于该相断路器的线路侧（或电源侧），而另一相的接地点处于该相断路器的电源侧（或线路侧），则此时的短路电流为额定短路开断电流值的 86.6%，但它只流过在线路侧发生接地短路的那一相断路器，其瞬态恢复电压工频分量为线电压。因此，这一相断路器的开断容量按标么值计

算为  $\sqrt{3} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 1.5$ ，即比正常时大了一半。在两线一地系统中，只要任一相出线上发生接地短路，也会出现这一工况。此时，该相的断路器可能难于开断，故应对其进行异相接地时的开断与关合试验。

**发展性故障开断试验** 在开断小电感电流的过程中，因出现过电压导致主回路对地闪络而转变为开断大电流的故障，如开断空载变压器时可能出现过电压，导致闪络接地，这意味着在断路器开断小电流过程中突然出现数十千安的大电流。还有一些断路器的灭弧室依赖开断电流自身的热效应使灭弧室内产生高压自激灭弧，小电流的热效应不足以形成足够的灭弧压力，电弧延烧时间可能加长，此时动触头行程已接近走完。在上述条件下突然出现数十千安的大电流可能使断路器开断失败，特称此种工况为发展性故障。但对近代的快速断路器而言，上述工作条件一般会导致发展性故障。IEC TC. 17A 分技术委员会已于 1982 年 6 月的巴西年会上取消了这一技术要求。

**并联开断试验** 在三角形、多角形、内桥、外桥及

一个半断路器接线方式中，带同一负载的并联的两台断路器同时动作去开断同一个电流，当这两台断路器的断口分离瞬间有近毫秒的差异时，因弧道电阻的影响，同一个电流在这两台并联的断路器中分配不均，分配比例可能是 2/8、3/7、4/6 或 5/5。某些自激式断路器具有临界电流，当两台断路器的开断电流很不相同时，电流小的那一支路的燃弧时间长，电弧可能难以熄灭，电流大的那一支路的燃弧时间短，灭弧快。当大电流支路的断路器灭弧后，全部电流均转入小电流支路，这样的工况类似于发展性故障。根据与发展性故障同样的机理，并联开断也有可能导致开断失败事故。SF<sub>6</sub> 和压缩空气断路器均能顺利地完 成并联开断。1982 年 6 月 IEC TC. 17A 分技术委员会决定，取消了并联开断的技术要求，并不再制定试验文件。

**开断与关合电容器组试验** 电力系统中的并联电容器常是多组并联，用来开合并联电容器组的断路器在承受系统短路电流的同时，还要承受其他电容器组向断路器施加的涌流。中国常采用 6%~13% 的串联电抗器，其涌流频率约为数百赫兹。高频涌流能使断路器的油灭弧室内产生破坏性压力，并增大电动力。当涌流的幅值与工频短路电流幅值相接近时，确定电动力的计算电流值应提高 20%，对油断路器在开断过程中不允许有重击穿。开合并联电容器组的断路器要求频繁操作，日达数次，试验时也应反映这一技术要求。

**空载架空线路操作试验** 超高压线路空载下的重合闸过电压是决定线路绝缘水平的重要依据（见合闸过电压、开断电容负载过电压）。在断路器断口上并联低值合闸电阻可以有效地防止这种过电压，或者采用不发生重击穿的断路器。在少油型断路器中增设压油活塞，可以提高电弧电流过零后的弧区绝缘，避免重击穿。断路器操作顺序对重合闸过电压的影响也很大，单分时的重击穿概率低，重合闸操作时的重击穿概率高。在三相重合闸的操作顺序中有可能出现重合闸切空线方式，但概率很低。IEC 规定的切空线操作顺序是“分”或“合—分”。中国自 20 世纪 70 年代以来对一系列 220 kV 级少油断路器和 SF<sub>6</sub> 断路器一律以“分—0.3 s—合分”顺序进行操作空载长线的试验（300 km 以上），并获得所有的试验最后都能达到无重击穿的成功结果。

操作空载线路的试验次数：三相试验，不选相，10 次；单相试验，选相操作，选相间隔 30°（电角度），12 次；单相试验，不选相操作，30 次。

为了使操作空载线路试验中瞬态恢复电压的起始部分能再现系统中的严重情况，IEC 又规定了两种试验回路——回路 A 和 B，它们分别代表系统内的高阻抗电源和低阻抗电源

**空载变压器开断试验** 空载变压器的开断属于小电感电流的开断,开断电流值为数安或更小。开断空载变压器伴随有截流现象,截流磁场释放的能量受铁芯磁滞损失的影响而被消耗,仅有百分之几转变为附属电容上的电位能,因此截流过电压不高,能量不大。经验表明,处于空载变压器高、低压侧的避雷器均能有效地保护变压器。国内外均有论证,可以取消这一试验要求。

**操作并联电抗器试验** 操作并联电抗器需开断约数百安的小电感电流,其开断机理与开断空载变压器相似,但由于电流较大,因而截流值可能较高,并且在并联电抗器磁路中有气隙,磁路中的磁场能释放时磁滞损失不严重,因此这种操作过程中的过电压较高。操作并联电抗器的过电压与断路器类型有关, SF<sub>6</sub> 类断路器的操作过电压不显著,而压缩空气型断路器的操作过电压很高,必须在其断口上设置相当的并联电阻,如对 500 kV 级空气断路器的并联电阻应为 10~20 kΩ 才能保证顺利操作,否则将导致严重过电压事故。IEC 的技术委员会正就此项技术要求制定有关的试验导则。

**操作电动机试验** 电动机在制动状态下或启动时的操作过电压最为严重,操作顺序为“合分”。由于电动机的绝缘裕度较小,操作时的过电压易导致绝缘破坏事故。用于操作电动机的真空断路器以及带有压油活塞的少油断路器截流能力较强,易导致事故,对这类断路器须进行操作试验。

**临界电流开断试验** 临界电流为额定短路开断电流的 2%~3% 及 4%~6%。

**电寿命试验** 测试连续开断额定电流的能力或连续开断额定短路开断电流(或各种工况的组合)的能力的试验。电寿命试验费用高,时间长,一般不单独进行,但对设备运行人员极有参考价值。IEC 对此无确切的定义,也不为之制定标准。但是,世界上许多重要厂商出于产品竞争的需要,常提供有关电寿命的参考数据,如“能不需检修的连续开断电流千安值”。

#### 参考书目

曹荣江, 交流高压断路器的运行条件, 北京: 水利电力出版社, 1985

(曹荣江)

kaiguangui

**开关柜** (switchgear panel) 按电气主接线的要求,以开关设备为主,将断路器、负荷开关、高压熔断器、隔离开关、互感器、套管、母线等电气元件,按一定顺序成套布置在一个或几个金属柜内的配电装置。柜内还可装设控制、测量、保护和调节装置。柜内

以空气、SF<sub>6</sub> 气体或复合绝缘作为介质。主要用于配电系统接受和分配电能,并能保护电源和计量用电量。开关柜的优点是占地少,结构紧凑,安装使用方便,经济实用,整齐美观,适用于工厂批量生产。

开关柜有多种分类方法。按内装断路器的型式不同,可分为少油型、真空型和六氟化硫型;按安装方式不同,可分为固定式和移开式(手车式或抽屉式);按柜体结构不同,可分为敞开式、半封闭式和封闭式(包括金属铠装式、间隔式和箱式);按使用环境不同,可分为一般环境用和特殊环境用(包括矿用、船用、化工、湿热带和高寒地区等);按安装位置不同,可分为户内式(包括考虑凝露和不考虑凝露型)和户外式。

开关柜通常要求具有以下性能:①柜体结构有足够的机械强度,能防止事故蔓延扩大。②在高压一次侧主回路不停电的情况下,能安全地检修二次侧设备。③操作一次侧开关设备时,二次侧继电保护等元件不会误动。④具有机械或电气的闭锁装置,以防止误分、合断路器,防止带负荷分、合隔离开关或插头,防止带电挂地线或合接地刀闸,防止误入带电间隔,防止带地线或接地刀闸在合闸位置时合断路器等,并具有紧急处理的解锁装置。⑤机械闭锁的开关柜,能保证断路器分、合闸速度及触头行程不受影响。

中国于 20 世纪 50 年代初开始生产敞开式高压开关柜。60 年代开始生产移开式开关柜,以替代固定敞开式开关柜。但到 80 年代初,固定敞开式开关柜因其售价低廉,绝缘可靠而继续采用,并进一步改进为半敞开式开关柜与移开式开关柜并存。与此同时,世界各国已开始生产环网开关柜和充 SF<sub>6</sub> 气体的开关柜,还将高、低压开关柜与变压器装在一起发展成箱式变电站。

(顾宽鸿)

kaiguangui shiyan

#### 开关柜试验 (tests of switchgear panel)

根据有关技术标准,采用测试手段对开关柜的性能及质量状况进行的检验。开关柜产品的试验分为型式试验和出厂试验。

**型式试验** 由于开关柜内的各种组件分属不同设备类别和产品系列,组合方案也比较多。因此,对同一型号的各种接线方案,其型式试验可只针对具有代表性的型类进行。通常型式试验项目有:①主回路、二次回路和辅助设备绝缘耐压试验;②断路器及隔离开关的机械特性和机械稳定性试验;③机械稳定性试验前后的主回路温升试验;④主回路电阻测量;⑤主回路和接地回路的动、热稳定试验;⑥断路器关合和开断能力试验(包括异相接地关合和开断试验);⑦封闭式开关柜的防护等级试验;⑧内部故障电弧试验;⑨闭锁装置



的功能及机械稳定性试验；⑪泄漏电流测量；⑫操作振动试验；⑬颠簸试验；⑭局部放电试验；⑮老化与湿度试验；⑯防雨试验，仅适用于户外开关柜。

出厂试验 开关柜批量产品在出厂前每台所进行的例行试验，通常的试验项目有：工频耐压试验、机械特性试验、主回路电阻测量、闭锁功能试验。

(顾爱鸿)

kaiguanzhan

**开关站** (switching station) 为提高输电线路运行稳定度或便于分配同一电压等级电力而在线路中间设置的没有主变压器的电气设施。开关站是由断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、母线以及相应的控制、保护和自动装置等组成，同时也可安装各种必要的补偿装置。开关站中只设一种电压等级的配电装置。开关站用于 220kV 及以上的输电线路中。

为将容量的水电站或煤矿区火电厂的电力输送到远处的负荷中心，输电线路可能长达数百公里，这时需要设置开关站将线路分段，以降低工频过电压和操作过电压，提高电力网运行的稳定度，并减小线路故障时影响的范围。长距离输电线路的分段数目需根据技术经济比较结果确定，一般分为 2~4 段。

根据需要，开关站中有时还设置串联电容补偿装置，利用串联电容的容抗抵消线路部分的感抗，缩短输电线路的电气距离，以提高输电容量和电力网的稳定度。

参见彩图插页第 11 页 34 图。

(赵正铨)

kekong baohediankangaxing jingzhibuchangzhuangzhi

**可控饱和电抗器型静止补偿装置** (controllable saturated reactor, CSR) 通过变化饱和电抗器控制绕组中的直流电流来改变铁芯的饱和程度和电抗器的感抗值，以调节其无功补偿功率的静止补偿装置。其主要优点是结构简单，运行可靠，出力能连续平滑地正负调节，短时过载能力较大，运行维护工作简单。缺点是反应慢，动态响应时间约 40~100 ms，电压下降时其无功出力要按电压平方成比例地下降，不能分相快速调节，不能抑制电压闪变，产生的高次谐波多，噪声大，能耗及投资都较大。

结构原理 可控饱和电抗器本身的结构原理如图 1 所示。三相结构中，中间两柱各放一个相同的交流工作绕组，相互串联反接如图 1 (b) 所示，使  $\phi_{\text{交}}$  在直流控制绕组中感应的电动势为零。当  $I_d=0$  时，铁芯不饱

和，饱和电抗器基本不吸收无功；当  $I_d$  增大时，铁芯随之饱和，感抗值下降，饱和电抗器吸收无功并随之相应增大。因此，可通过调节  $I_d$  来改变饱和电抗器吸收的无功功率。

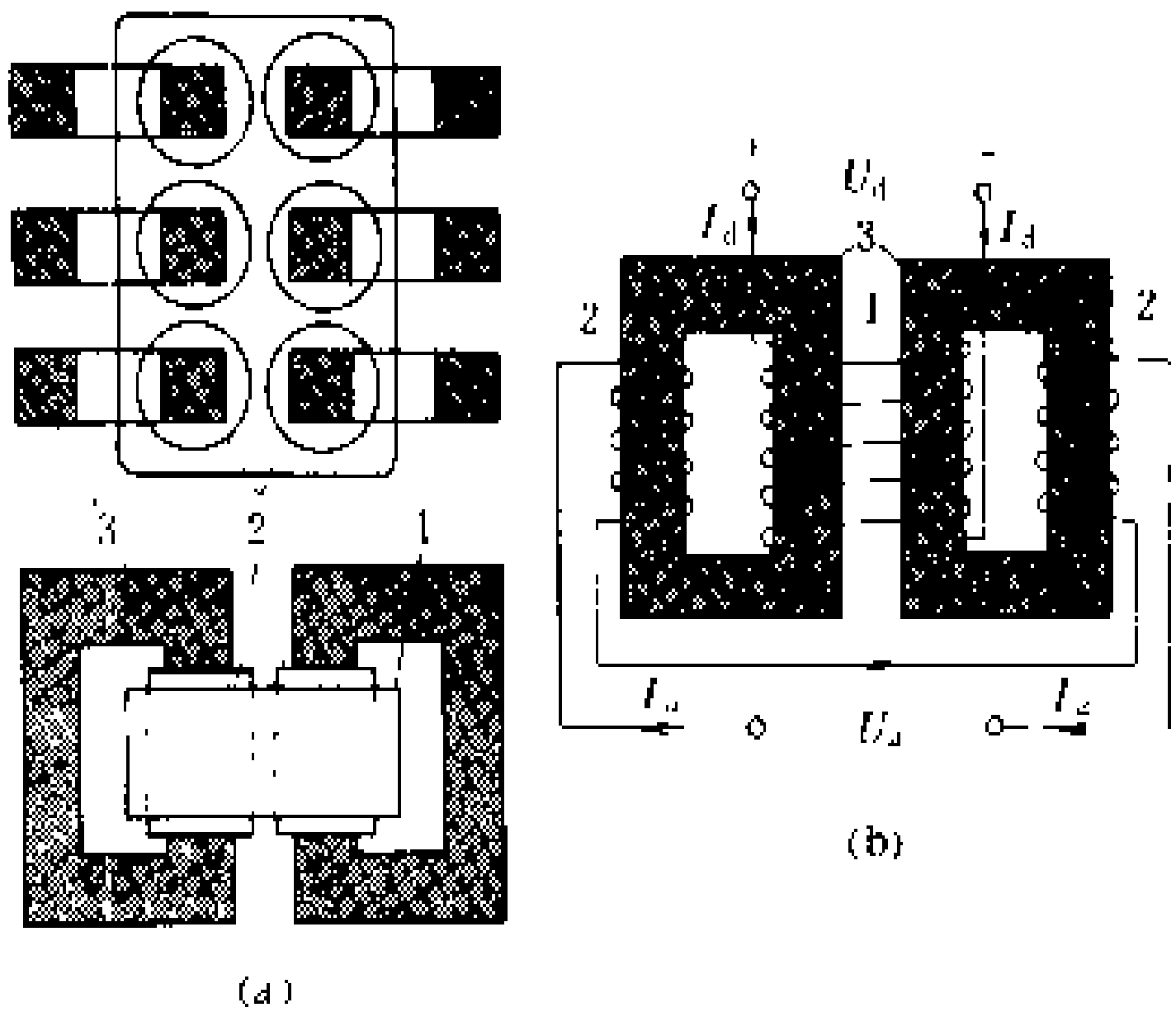


图 1 可控饱和电抗器结构原理

(a) 三相结构布置；(b) 单相电气原理接线

1—直流控制绕组；2—交流工作绕组；3—铁芯；  
 $U_d$ —交流电源电压； $I_d$ —交流工作电流； $\phi_d$ —交流磁通；  
 $\phi$ —直流磁通； $U_d$ —直流控制电压； $I_d$ —直流控制电流

整个补偿装置的原理接线图如图 2 所示。无功功率由滤波器供应，可控饱和电抗器的  $I_d$  由晶闸管调节器控制。调节器一般有恒母线电压、恒进线无功功率和恒进线无功电流三种调节方式。当负荷变化，控制参量值与调节器的整定值出现偏差时，调节器即通过控制晶闸管改变  $I_d$ ，来调节饱和电抗器吸收的无功功率，使控制参量恢复到原来的恒定值。

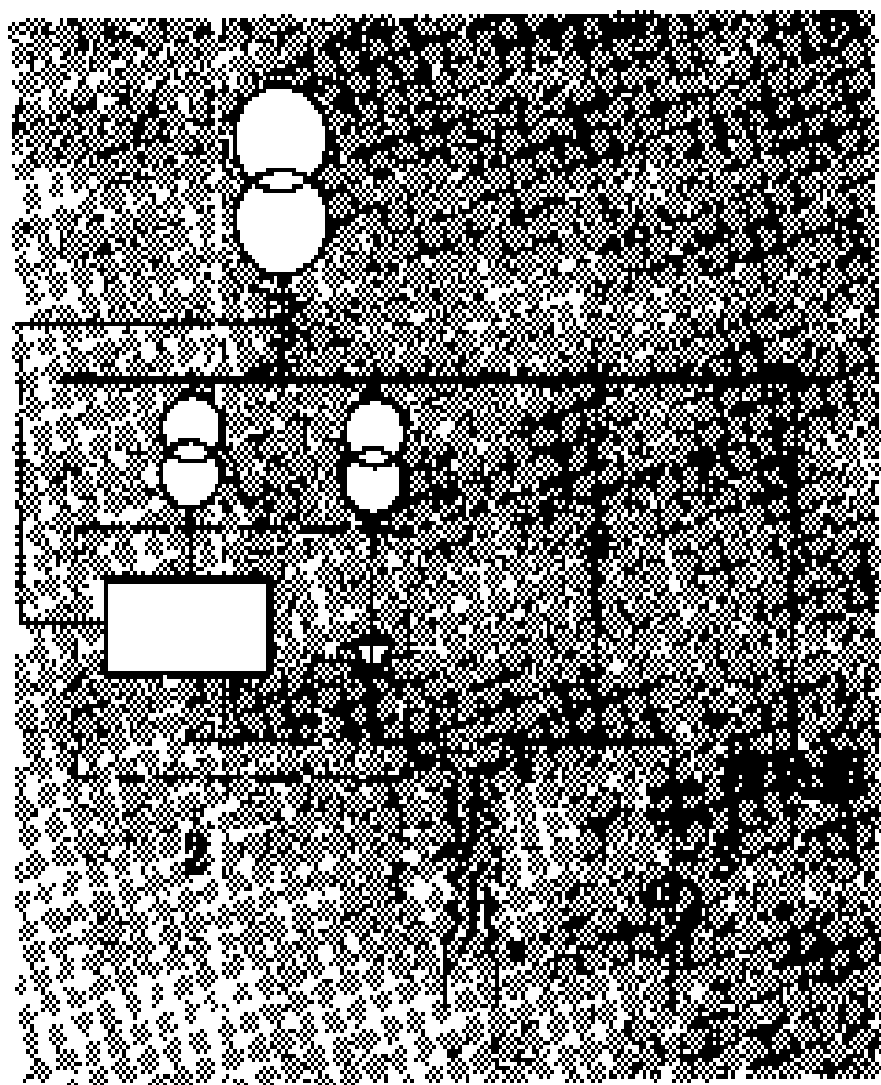


图 2 可控饱和电抗器型静止补偿装置原理接线图

1—可控饱和电抗器；2—调节器；3—滤波器

为加快调节速度，改善调节质量，常采取以下措施：①将  $I_d$  的最小值限制在额定值的 5%~10%，以保证电抗器总是在磁化特性的饱和段和接近饱和的线性段工作；②晶闸管整流桥采用全控桥接线，以便需迅速减少无功时能通过晶闸管逆变实现快速减磁；③采用 5~10 倍以上的高强迫倍数；④实行  $I_d$  的小闭环调节，以防强行励磁、快速减磁时发生无功振荡。此外，为减少高次谐波电流的产生，可控饱和电抗器的交流工作绕组采用曲折接线方式。

用途 主要用于轧钢机等冲击负荷的无功补偿，以提高功率因数，改善电压质量，使动态电压波动可控

制在±5%以内。(见静止补偿装置)

发展简况 可控饱和电抗器型静止补偿装置是开发最早的一种静止补偿装置,在20世纪60年代初就已在外国研制成功并应用于工业冲击负荷的无功补偿。目前,由于其性能不如其它静止补偿装置,国外已基本不再生产。中国武汉钢铁公司在1978年从比利时ACEC公司引进了四套容量共145.4 Mvar的可控饱和电抗器型静止补偿装置。1981年电力科学研究院等单位联合研制成一套容量为5 Mvar的可控饱和电抗器型静补装置,在武汉谏家矶变电所投运。

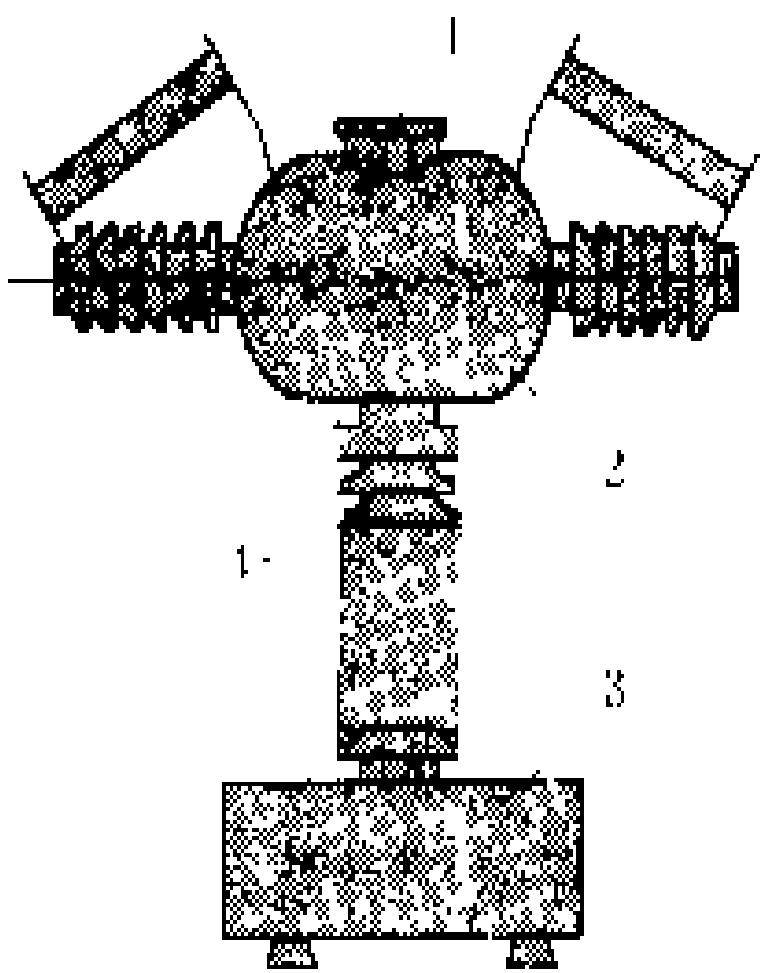
(何丰仁 马廷绪)

kongqi duanluqi

**空气断路器** (air circuit breaker) 以压缩空气为灭弧介质和绝缘介质的断路器。使压缩空气强烈地通过弧区以熄灭电弧,并为支柱瓷套内腔通风,以保持内腔的干燥。压缩空气是先将空气压缩至15~20MPa的压力,再减压至2~3MPa而获得的相对湿度为15%~20%的干燥空气,这样可避免在日温差变化达20~30℃时出现饱和而析出水分。

空气断路器通常由灭弧室、支持结构和储气系统组成,可分为瞬时充气式、分闸充气式、常充气式和恒压式四种:①瞬时充气式空气断路器在分、合动作时,压缩空气才由储气罐中引出至工作部位,这种结构的灭弧室压力建立较慢,开断能力较低,且需要外隔离断口。②分闸充气式空气断路器只有当分闸时,触头间才出现压缩空气,并保证不外逸,触头维持在分闸位置;合闸时,压缩空气被排向大气,触头在弹簧作用下闭合。这种结构虽然省去了外隔离装置,但灭弧过程与瞬时充气式的一样,也称为瓷瓶充气式空气断路器。③常充气式空气断路器的储

气罐位于支持瓷瓶上端,灭弧室处在罐中,罐内长期储存压缩空气,故也称罐式空气断路器。在动、静触头分离瞬间,压缩空气立即形成灭弧气流,动作快,开断能力强(见图)。④恒压式空气断路器是在常充气式的基础上,由储气罐继续补气以维持灭弧室工作压力恒定,使开断能力不致下降。



220 kV、26.5 kA 常充气式空气断路器结构原理图  
1—灭弧室; 2—储气罐; 3—空气压缩系统; 4—支持瓷瓶

空气断路器的开断能力受恢复电压初始上升陡度的影响很大。在断口上加装分闸并联电阻可降低恢复

电压的初始上升陡度。空气断路器的触头系统一般为对接式,为避免在气流场中出现“死区”(它可能导致开断的失败),有时也采用单边吹弧结构,可使对接触头的“死区”缩小。

空气断路器的优点是介质无毒,无火灾危险,动作快,单断口开断能力强,采用积木式结构可以满足不同电压和开断能力的需要,并便于进行开断试验,且适于低温地区的环境条件。它的不足之处是噪声大,元件多,需要压缩空气辅助体系,价格比油断路器贵,事故率也比较高。空气断路器首先被用于超高压、大容量场所。

空气断路器的制造水平已能达到:电压765~1150 kV,额定短路开断电流达40~50 kA,单断口电压达70 kV,额定电流达4000 A。近年来,空气断路器的发展已趋于停顿,有被六氟化硫断路器取代的趋势,但在低温地区(如加拿大等部分地区),空气断路器仍占据主导地位。

参见彩图插页第22页66图。  
(曹荣江)

kongqi yasuo xitong

**空气压缩系统** (compressed air system)

由生产、储存和分配压缩空气三个部分组成,供空气断路器的灭弧、绝缘、通风或操作以及气动隔离开关的操作之用。

由空气压缩机产生的压缩空气经三级冷却使其温度降低后,进入三级油水分离器,将油水分离后再经逆止阀、截止阀进入高压储气罐储存起来。使用时高压空气又经空气过滤器进入减压阀降为工作压力,再经气水分离器进入配气网,送入各断路器的储气筒。如配电装置中有气动隔离开关时,压缩空气的气压还需再经减压阀降为隔离开关操作压力后才可供气动隔离开关使用。

对空气压缩系统的主要要求有:①配气网和断路器储气筒内压缩空气的压力值不低于制造厂所规定的最低值。当有自动重合闸时,空气断路器储气筒容积和筒内压缩空气压力能满足断路器跳闸、合闸、再跳闸周期动作的需要。②进入配气网前的压缩空气先需进行干燥,以防止压缩空气由于周围环境温度变化引起潮气凝结,使部件锈蚀和绝缘击穿。压缩空气干燥一般采用减压干燥法,即用减压阀降低压缩空气压力以降低其相对湿度。③避免外部尘土微粒被吸入空气压缩机中,同时要清除设备中的油垢和管通中的铁锈等,使压缩空气尽量洁净。

主要设备 包括空气压缩机、高压储气罐、减压阀、气水分离器、工作压力储气罐、空气过滤器等。①

空气压缩机。它是由曲轴带动活塞在气缸中往复运动吸入空气并产生高压空气的设备。空气压缩机的压力与断路器额定工作压力的比值称为减压比。减压比偏低时则可能在断路器内部出现凝露，但又与充气温度及地区温差有关。当减压比为 6 时，如在 20℃ 时经减压阀向断路器充气，不出现凝露的最低允许温度为 -5℃，即最大允许温差为 25℃。如减压比为 2 时，则允许温差为 9℃。空气压缩机产生的压缩空气除满足断路器分合闸作灭弧介质的消耗需要外，还需满足运行中断路器瓷柱内腔的经常通风消耗、断路器不严密处的漏气以及管道和配件中的漏气消耗。空气压缩机的总容量通常取大于全部压缩空气系统在正常情况下总泄漏量和断路器通风量的 2.5 倍。此外，再增加一台备用空气压缩机。②高压储气罐。用来储存高压空气和除去高压空气中经油水分离器后尚未除尽的水分。高压储气罐要求布置在空气压缩机室外的背阴处，使不受阳光直射，以免温度升高后不利于高压空气中水份的凝结。高压储气罐的容积要求当空气压缩机启动又能满足断路器操作的需要时高压储气罐的压力不能小于减压阀高压侧的最低允许压力值。③减压阀。它可将高压空气的压力降低到工作压力，并且能同时降低压缩空气的相对湿度。减压阀有机械式和电磁式两种。④气水分离器。装在减压阀后面的空气管道中，用来分离进入配气网中压缩空气因冷却而析出的水分。⑤工作压力储气罐。用来增加配气网的容量，以便能迅速恢复配气网和断路器由于操作面造成的压力降低。此外，它还能缓和压力变动，减少减压阀的动作次数。工作压力储气罐的容积按减压阀动作周期和配气网所允许下降的压力来选择。⑥空气过滤器。用来过滤管道中的锈蚀物和灰尘，以提高进入断路器中压缩空气的清洁程度。

发展趋势 各国都趋向于提高空气压缩机的压力，以提高减压比，这样有利于提高压缩空气的干燥程度和快速补气。今后，利用压缩空气作为断路器灭弧介质和绝缘介质的情况将逐渐减少。当压缩空气用作气动操动机构的气源时，不少国家的断路器都自带小型空气压缩机，它具有就近补气、压缩空气系统简化和运行维护简单等优点。

(叶景星)

kongzhi dianlan

**控制电缆** (control cable) 连接电气设备二次回路的电缆。包括保护、自动装置及测量表计的交直流电流和电压回路的电缆，控制、信号、保护和自动装置的直流回路的电缆，发电厂和变电所的计算机输入和输出回路的电缆等。控制电缆是二次回路的电气通道。

对控制电缆的要求 主要是：①电缆的选型及芯线截面的选择正确；②电缆敷设可靠、合理，火力发电厂中控制电缆和电力电缆通常是一起用计算机进行敷设设计，要考虑防火、防热和免受机械损伤，同时有较强的抗干扰能力；③控制回路尽量选用多芯电缆，力求减少电缆根数；④控制电缆路径要短，以节约电缆的费用。

控制电缆的绝缘水平 用于强电控制回路时为 500 V 及以上，用于弱电控制回路为 220 V 及以上。控制电缆通常选用铜芯电缆。根据机械强度的条件，强电控制电缆截面不小于 1.5 mm<sup>2</sup>，通常为 1.5~6 mm<sup>2</sup>；弱电控制电缆截面不小于 0.5 mm<sup>2</sup>，通常为 0.5~1.0 mm<sup>2</sup>。较长的控制电缆多留有适当的备用芯数。控制电缆芯线的长期允许工作温度不超过 65℃，敷设电缆的温度不低于 -10℃。

型号及使用环境 控制电缆可按用途、绝缘及缆芯材料分类，并可从型号标记中区分出来。例如中国的控制电缆型号的第一个字母通常以“K”表示，弱电信号电缆用“P”表示。

电缆的额定电压，应等于或大于所在回路的额定电压，电缆的最高工作电压不得超过其额定电压的 15%。根据电缆的使用条件和环境，通常选用不同绝缘护套及外护层的控制电缆，敷设在室内、电缆隧道或沟道中、管道内及地下。

强电回路控制电缆通常选用聚氯乙烯或聚乙烯绝缘、聚氯乙烯护套铜芯电缆，有时也选用橡胶绝缘、聚氯乙烯或氯丁烯护套铜芯电缆。在寒冷地区，通常选用聚乙烯绝缘耐寒塑料护套控制电缆。当用于需要承受较大机械外力作用的条件下，通常选用将上述电缆外加钢带铠装的控制电缆。对在环境有可能着火的场所，敷设电缆又未采用封闭槽道时，通常选用阻燃电缆。对环境温度高于 65℃ 敷设时，则选用耐热型电缆。

弱电回路控制电缆在无机机械外力作用的室内或隧道内时，通常选用聚氯乙烯绝缘及护套的信号电缆；在不承受大拉力的地下通常选用聚氯乙烯绝缘及护套钢带铠装信号电缆；在不承受大拉力的室内或隧道内则选用裸钢带铠装信号电缆。对屏蔽的要求较高时，通常选用聚乙烯绝缘铜带绕包屏蔽塑料电缆、铅包电缆或多芯屏蔽电子计算机电缆。

计算机信号电缆，低电平输入的热电偶电缆通常选用带屏蔽补偿电缆及对绞屏蔽计算机用电线；低电平输入热电阻 (0~±1 V) 和高电平输入 (>±1 V, 0~50 mA) 的电缆选用对绞屏蔽计算机用电线。电缆屏蔽层的型式可为铜带屏蔽或铝箔屏蔽。开关量输入/输出电缆 (<60 V 或 <0.2 A) 可选用一般控制电缆。

控制电缆选择 测量表计交流电流回路电缆的截



面积不宜小于  $2.5\text{ mm}^2$ ，允许电流为  $20\text{ A}$ 。控制电缆芯截面通常是按照电流互感器的负荷(欧姆值)不超过仪表所要求的准确级下允许的负荷数值进行选择。

保护装置交流电流回路电缆，是根据电流互感器的误差曲线进行选择。根据装设保护装置的一次设备所在实际系统的最大短路电流计算电流倍数，由电流互感器的  $10\%$  误差曲线中查出其允许阻抗值，再按电缆的敷设长度来选择缆芯导线截面。

电压回路的控制电缆，按允许电压降来选择缆芯截面。电压互感器二次回路的电压降，对用户计费的  $0.5$  级电能表不宜大于  $0.25\%$ ，对电力系统内部的  $0.5$  级电能表不应大于  $0.5\%$ ，至监视用测量表的电压降为  $1\%\sim 3\%$ ，对保护和自动装置的电压降不宜超过  $30\%$ 。用于距离保护的电压互感器，需满足在保护装置的二次电压回路末端二相短路时，电压互感器二次侧的自动空气开关或熔断器的动作或熔断时间的要求。

控制、保护和信号直流回路的控制电缆，一般按在正常最大负荷下至各设备端子上的电压降不超过  $10\%$  的条件来选择电缆芯的截面。

控制电缆的敷设计计 发电厂或变电所的控制电缆和动力电缆都需统一考虑，敷设方式要因地制宜，根据电气设备位置、出线方式、工艺设备布置等现场情况决定。控制电缆的敷设计计尚应考虑以下因素：

(1) 控制电缆通常选用多芯电缆，并留有适当的备用芯数。备用芯应结合电缆长度、芯线的截面及电缆敷设等因素综合考虑。强电控制电缆的芯数不宜超过  $37$  芯，弱电控制电缆的芯数不宜超过  $50$  芯。

(2) 在同一根多芯电缆内不应有两个不同设备或线路的电缆芯；在一个设备或线路内截面相同的交、直流回路必要时可共用一根多芯电缆。双重化保护的电流回路、电压回路、直流电源回路、双套跳闸线圈的控制回路等，两套系统不能合用一根多芯电缆。

(3) 为减少强电控制回路对弱电控制回路的干扰，不将强电与弱电回路的芯线共置于一根电缆内。弱电用屏蔽式电缆，其外皮一端接地。同一回路到户外去的缆芯，应安排在同一根电缆内，避免同一回路通过两根电缆构成环路。弱电控制电缆在高压配电装置内敷设，应尽可能离开高压母线及高频暂态电流的入地点，同时其走线尽可能成辐射状或树枝状，避免出现环路。

(4) 计算机的输入信号电缆在带盖的电缆槽中敷设。信号大于  $60\text{ V}$  或  $0.2\text{ A}$  的仪表信号电缆及没有噪声吸收措施的开关量输入或输出的信号电缆(如无消弧措施的继电器回路电缆)，不得通入电缆槽道。槽道与盖板应保证良好接地。单根计算机信号电缆应穿在钢管中敷设。

(5) 控制电缆不宜和动力电缆在一个电缆管内敷设。在沟道中或架空托架上敷设时，通常将控制电缆敷设在动力电缆以下的电缆支架或托架上。计算机信号电缆槽通常在最下层。计算机信号电缆与一般控制电缆，允许在带有中间隔板的同一槽道中敷设。

(6) 为满足控制电缆引入柜盘的要求，电缆弯曲半径不小于  $10$  倍电缆外径。

(卓乐友)

kuabu diandongshi

**跨步电动势 (step potential-difference)**

见跨步电压。

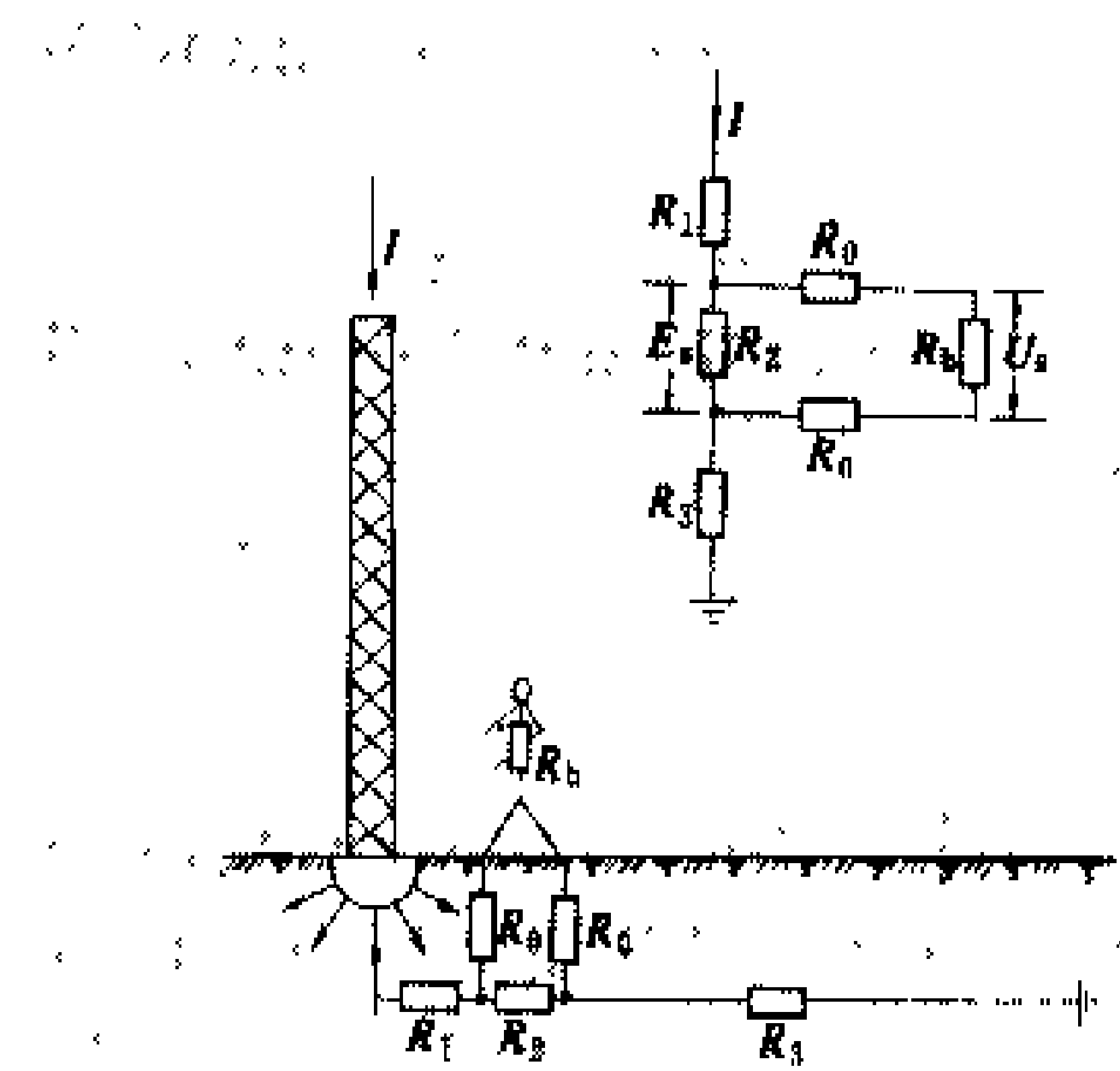
kuabu dianya

**跨步电压 (step voltage)**

电流自接地电极经周围土壤流散时，会在土壤中产生压降并形成一定的地表电位分布。相当于人的跨距的地面两点间的电位差称为跨步电动势，用  $E_s$  表示。人体两脚接触该两点时所承受的电压称为跨步电压，用  $U_s$  表示。两脚间的跨距在中国取  $0.8\text{ m}$ ，在美国取  $1\text{ m}$ 。 $U_s$  和  $E_s$  间的关系按图由下式决定

$$U_s = \frac{R_b}{R_b + 2R_0} E_s = \frac{R_b}{R_b + 6\rho} E_s$$

式中  $R_0$  为人的每只脚和土壤间的接触电阻， $\Omega$ ，可写成  $R_0 = 3\rho$ ； $R_b$  为入体的电阻， $\Omega$ ； $\rho$  为土壤的电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ 。

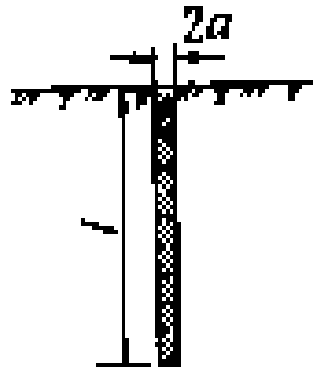
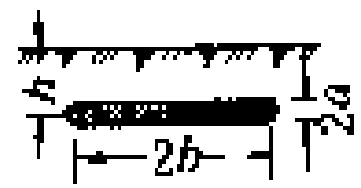
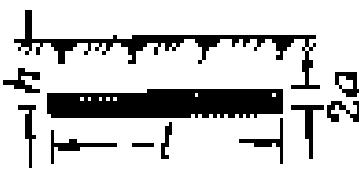



跨步电压和跨步电动势间的关系

跨步电动势的最大值出现在电极附近的地面上和地网突出边角外侧的地面上。最大跨步电动势  $E_m$  和相应的电极(或地网)电位  $IR$  ( $I$  为经电极或地网流散的电流， $R$  为电极或地网的接地电阻)的比值称为跨步电动势系数  $K_s$ ，即

$$K_s = \frac{E_m}{IR}$$

跨步电动势系数 K<sub>s</sub> 值

垂直接地极	圆环接地极	水平接地极	方 形 地 网
			 <div>外缘总长为 <math>L_1</math>，接地体总长为 <math>L</math>，接地体直径为 <math>d</math>，埋深为 <math>h</math>，接地网的面积为 <math>S</math></div>
$\frac{\ln \frac{a+T}{a}}{\ln \frac{2l}{a}}$	$\frac{\ln \frac{h^2 + \left(h + \frac{T}{2}\right)^2}{h^2 + \left(h - \frac{T}{2}\right)^2}}{\ln \frac{64b^2}{hd}}$	$\frac{2T}{h \ln \frac{l^2}{dh}}$	<div><math>h=0.6\text{ m}</math> 时为</div> $1.28 \left[ \frac{L-L_1}{L} \times \frac{0.48}{S^{0.25}} + \frac{L_1}{L} \times \frac{0.61}{\ln \frac{9\sqrt{S}}{d}} \right]$ <div><math>h=0.8\text{ m}</math> 时为</div> $1.28 \left[ \frac{L-L_1}{L} \times \frac{0.41}{S^{0.25}} + \frac{L_1}{L} \times \frac{0.48}{\ln \frac{9\sqrt{S}}{d}} \right]$
$T$ 为 跨 距			

表中列出了各种电极和地网的  $K_s$  值。

跨步电动势的大小不应危及人身的安全。在大接地短路电流系统中，跨步电动势的允许值  $E_p$  为

$$E_p = \frac{250 + \rho_0}{\sqrt{t}}, \text{ V}$$

式中  $\rho_0$  为人脚站立处地表面的土壤电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ； $t$  为接地短路电流的持续时间，s。

对 500 kV 系统的地网， $E_p$  取

$$E_p = \frac{174 + 0.7\rho_0}{\sqrt{t}}, \text{ V}$$

在小接地短路电流系统中，跨步电动势的允许值为

$$E_p = 50 + 0.2\rho_0, \text{ V}$$

在地面铺设沥青混凝土或碎石可以提高  $\rho_0$ ，从而提高  $E_p$  的数值。

(解广润)

kuaisu jiedi kaiguan  
**快速接地开关** (high speed earthing switch)

一种具有关合短路电流能力，专门用于电力系统人工接地的快速隔离开关。一般配有液压或电动的快速操动机构。在具有多个并联主变压器支路的电力系统中，为了节省投资，通常以快速接地开关代替主变压器支路的高压断路器。当主变压器本体发生故障时，主变压器保护起动高压侧快速接地开关进行合闸操作，造成电力系统人工接地，起动电力系统继电保护装置，致使输电线路对侧的断路器分闸，切断主变压器故障。

快速接地开关通常还装于气体绝缘金属封闭电器中，安装在每回出线的出口侧，用来闭合平行回路产生的感应电流。快速接地开关具有关合短路电流的能力，

通常在 110kV 电力系统中要求关合电流为 80 kA，在 220 kV 系统中为 125kA。气体绝缘金属封闭电器中的快速接地开关，密封在  $\text{SF}_6$  气体绝缘的筒体中，关合短路电流的要求比较容易实现。而敞开式快速接地开关，当要求关合的短路电流较大时，往往用真空断路器来代替。

(蓝增廷)

Kuibeike Shuidianju Yanjiusuo dagonglü shiyanzhan  
**魁北克水电局研究所大功率实验站** (high power laboratory of Hydro - Quebec's Research Institute) 简称 IREQ 大功率实验站，位于加拿大魁北克省蒙特利尔市东北 29 km，与布谢尔维里 (Boucherville) 735 kV 变电所毗邻，于 1973 年建成。该站最大短路功率为 25000 MV·A。网络电源进线有 735、315、230 kV 各一条，最大三相试验功率为 6000 MV·A，单相为 5400 MV·A。能进行直到 800 kV 的断路器的运行考核，研究 1500 kV 断路器及大功率试验方法等。

实验站的 230 kV 系统具有容量为 230 MV·A 的单相变压器，变比为  $(230/\sqrt{3})(1\pm 15\%) / 4, 8, 12, 16\text{ kV}$ ，经隔离开关二次转换可得 3~27.5 kV 各级电压。735 kV 系统具有单相变压器 6 台，每台短路功率为 1200 MV·A，变比为  $(735/\sqrt{3})/25(1\pm 10\%) \text{ kV}$ ，有 36 级抽头，可将其接入 315 kV 或 230 kV 系统，以获得较低的试验电压。三个试验小室尺寸均为 9 m×6.5 m×9 m(高)，耐爆水平为 37.8 MJ，相当于 9 kg TNT 炸药。

合成试验回路具有主电容器 288 台 (每台为 20  $\mu\text{F}$ 、30 kV)，总储能容量为 2.6 MJ；电抗器 288 台



(每台为 10 mH、30 kV)；电阻器 114 台，每台工作电压为 90、180 kV。试验大厅尺寸为 50 m × 38 m × 20 m (高)。最大单相试验功率为 5400 MV · A，可对 735 kV 级断路器整相进行合成试验。采用特殊接线还可对 1200 kV 级断路器整相进行合成试验。试验中全部控制采用计算机实现，全部测量采用数字模拟系统完成，测量误差为 3%。

参见彩图插页第 47 页 136 图。

(顾克鸿)

Kuibeike Shuidianju Yanjiusuo gaoya shiyanshi

**魁北克水电局研究所高压实验室** (high voltage laboratory of Hydro - Quebec's Research Institute) 简称为 IREQ 高压实验室，位于加拿大魁北克省蒙特利尔市东北 29 km 处，建于 1971 年 11 月，是北美最大的高电压实验室。该实验室设有高压试验大厅及户外试验场。高压试验大厅及其辅助厅可以满足交流 1500 kV 及直流 ±1200 kV 设备及线路绝缘性能的试验研究的需要。大厅尺寸为 67.5 m × 82 m × 51 m (高)，采用双层钢结构，全部地面都敷设了铜板拉网作为接地回线。由于六面屏蔽，形成了法拉第笼，电磁屏蔽效果甚佳。频率为 690 kHz 时，磁场屏蔽效果为 74 dB。大厅四周仅埋设了一圈铜带作为接地体，不需采取其它接地措施。为了吸音，在内墙及天花板上遍布小孔并覆盖以玻璃纤维棉及塑料薄膜。屋顶上装有 4 台 10 t 桥式吊车及 12 个固定吊点，以便起吊设备及试品。

大厅内主要设备有：两台冲击电压发生器，一台参数为 6.4 MV、400 kJ，另一台参数为 3.2 MV、200 kJ；一台 2.1 MV、1 A 的串级工频试验变压器；两台 1.2 MV、10 mA 的直流高压发生器；一台 5.4 MV 的阻容式分压器。还配有其他测量及辅助设备。所有大型设备均装在气垫上。大厅地面涂了环氧树脂护层，以利于气垫移动。

辅助厅中的设施有：污秽试验室、电晕试验（屏蔽）室、变压器试验室。

户外试验场占地 1090 × 160 m<sup>2</sup>，主要设施为试验线段及两个电晕试验笼。试验线段长 300 m，两端耐张

塔的横担高度及导线间距离均可调节。电晕试验笼的断面尺寸为 5.5 m × 5.5 m。两个笼并排安放。单个笼可以分别做各种分裂导线的交流或单极性直流电晕试验。两个笼之间的隔离铁丝网拆开后，可进行双极性直流电晕试验。

(郑健超)

Kuibeike - Xinyinggelan zhiliu hulian xitong

**魁北克—新英格兰直流互联系统** (Quebec - New England HVDC interconnection scheme)

美加国际间的一项多端超高压直流输电工程，包括一条 ±450 kV 双极直流架空线路和五座换流站。考虑经济性和运行的灵活性，此多端系统采用换流站并联接线方式。

加拿大魁北克水电局开发位于该省北部的詹姆斯湾 (James Bay) 的丰富的水力资源，计划将电力输送到加拿大蒙特利尔 (Montreal) 和美国东北部的新英格兰与波士顿地区。美国新英格兰地区每年需向加拿大魁北克水电局购买 30 亿 kW · h 的剩余水电。

本工程的直流架空线路全长 1475 km，最终输送功率为 2250 MW，年送电量 110 亿 kW · h。五座换流站中，有三座在加拿大境内，它们是拉迪森 (Radisson)、尼科莱 (Nicolet) 和康通 (Des Cantons)；另外两座在美国境内，它们是科默福特 (Comerford) 和桑迪池 (Sandy - Pond)。到 1992 年底，康通和科默福特两座换流站及其间的直流架空线路已建成并投入运行，其输电电压为 ±450 kV，输送功率 690 MW，线路长度为 172 km。这两座换流站的主要设备由美国通用电气公司和加拿大通用电气公司制造。

本工程不仅是世界上第一个多端超高压直流输电工程，而且采用了微处理机控制换流器中的晶闸管阀，完全取代了刚刚研制成功而尚未获得大量推广应用的高压直流断路器，这是高压直流输电技术的一项重大突破，进一步拓宽了高压直流输电的应用前景。

本工程正在兴建的三座换流站和改造已建成的两座换流站所需的设备，将改由瑞典通用电气公司 (现为 ABB 公司) 提供。

(任 震 赵智大)



参见彩图插页第2页4图。

(解广润)

# L

leidian canshu

**雷电参数** (lightning parameter) 描述雷云放电的一系列特征量。包括主放电通道波阻、雷电流波形、雷电流幅值概率分布、雷电流陡度概率分布、雷电极性、重复放电次数及对地输送的电荷量等。

**主放电通道波阻** 从工程实用的角度和地面感受的实际效果出发，先导通道可近似为由电感和电容组成的均匀分布参数的导电通道，其波阻抗为  $Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ ， $\Omega$ 。其中  $L_0$  为通道单位长度的电感量，H/m； $C_0$  为通道单位长度的电容量，F/m。中国取  $Z = 300 \Omega$ ，国外取  $Z = 300 \sim 3000 \Omega$ 。

**主放电** 即是沿着波阻抗为  $Z$  的先导通道传播的。

**雷电流波形** 世界各国测得的对地放电雷电流波形基本一致，多数是单极性重复脉冲波，少数为较小的负过冲，一次放电过程常常包含多次先导至主放电的过程（分别称第一次放电和随后放电）和后续电流。K. 贝格尔 (K. Berger) 等人在圣萨尔瓦托观测站测得大量雷电流波形图，图1、2、3分别为第一次负放电、正极性放电和随后负放电的平均电流波形，它们之间有明显的区别。第一次负放电电流波形波头较长，在峰值附近有明显的双峰；随后放电电流波形的波头较短，没有双峰，电流陡度远大于第一次放电，而电流幅值约为第一次放电的一半。随后放电之后，约有一半存在连续的后续电流，至少持续40 ms，电流从数十安至500 A，平均约180 A。

雷电流幅值

雷电流幅值

雷电流幅值

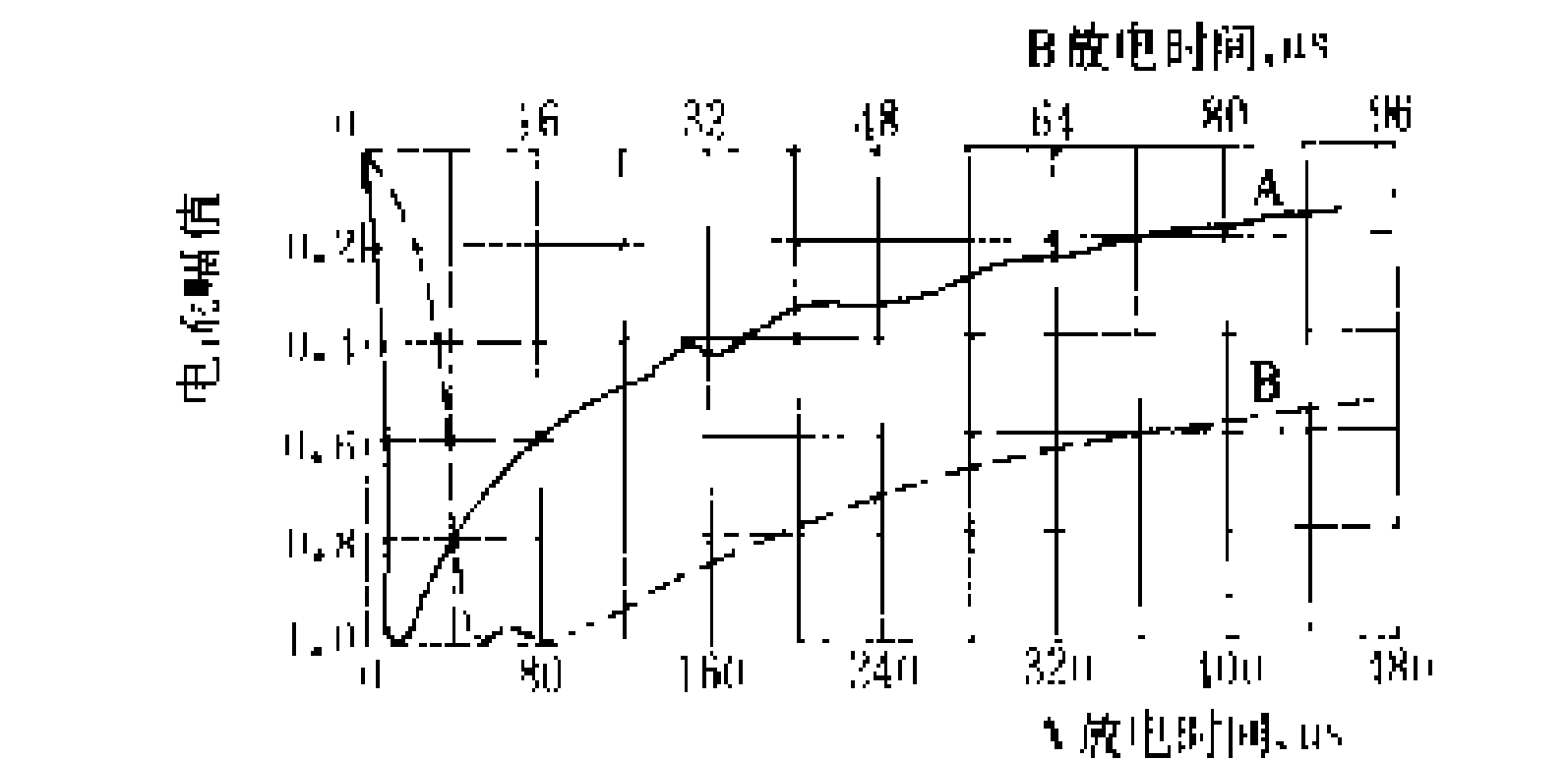
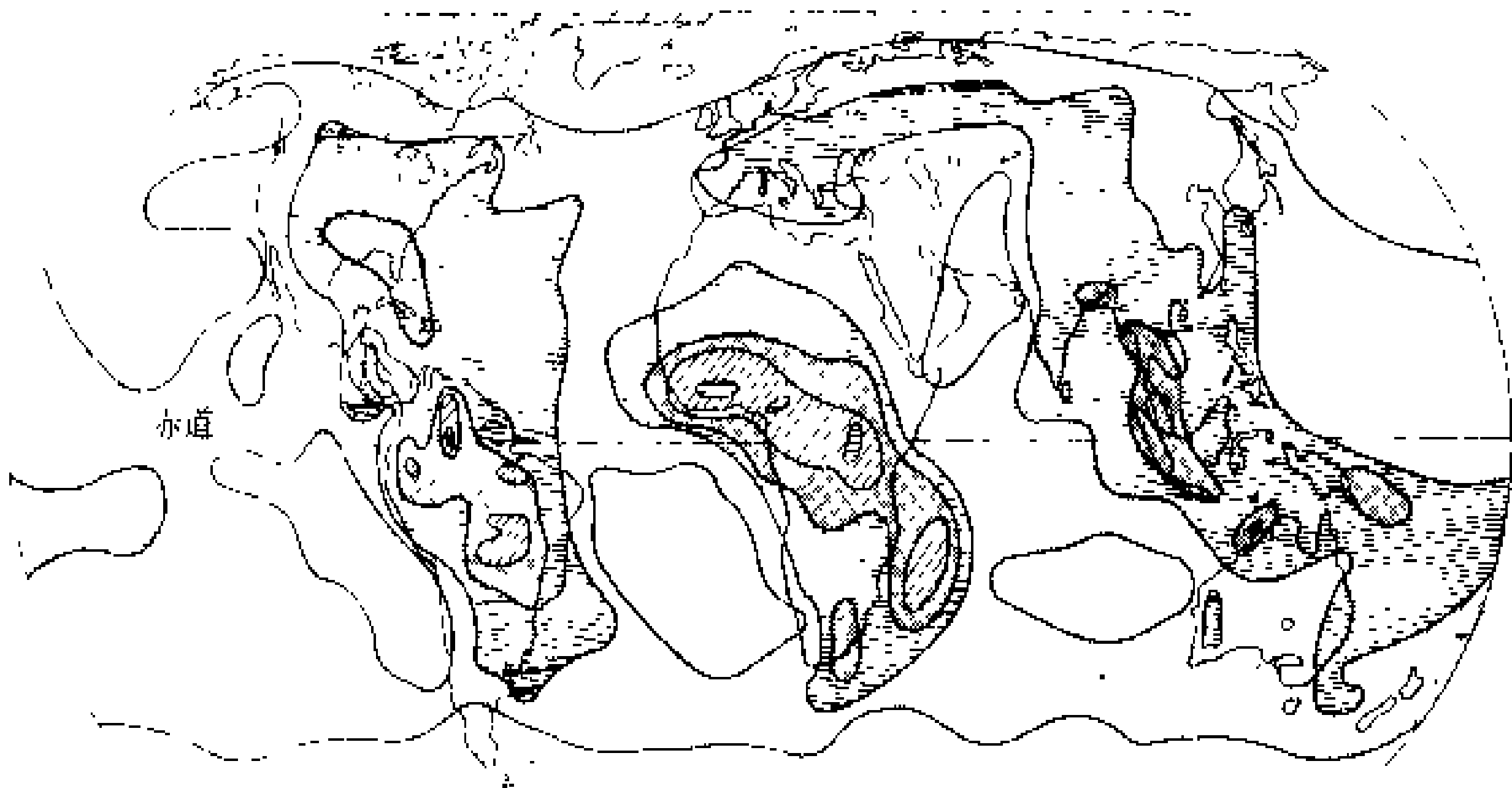


图1 第一次负放电平均电流波形

A—完整波形；B—放大的波前

leidian

**雷电** (lightning) 雷云对大地或者雷云之间的放电现象。雷电通道的形状主要是线状的，有时在云层中能见到片状雷电，个别极为罕见的情况下会出



全球雷暴日分布图

现球状雷电（见球雷）。雷云与地之间的线状雷电可能从雷云向下开始（见下行雷），也可能从地面突出物向上开始（见上行雷）。最常见的（约90%）是带负电的雷云向下放电的线状雷电，球雷则极为罕见。雷云放电时出现的光称为闪，而放电时周围空气受热膨胀形成压缩波出现的声音称为雷。雷云放电的距离可以通过测量雷声与闪光到达观测点时刻的不同按每千米雷声落后闪光3 s进行估算。距离大于15 km的雷很少能听到。一天内（一小时内）只要观测人员听到雷声就计为一个雷暴日（雷暴小时）。全球雷暴日的分布情况见附图。每个雷暴日每平方千米的对地放电次数用  $\gamma$  表示，称为地面落雷密度。 $\gamma$  与每年雷暴日数  $T$  的关系可表示为  $\gamma = AT^\alpha$ ，式中  $A$  为常数，系数  $\alpha$  随  $T$  的增大而增大，温带地区的  $\alpha = 2$ 。目前多数国家取  $\gamma = 0.1 \sim 0.2$ ，中国根据磁钢棒的实测结果，取  $\gamma = 0.015$ 。

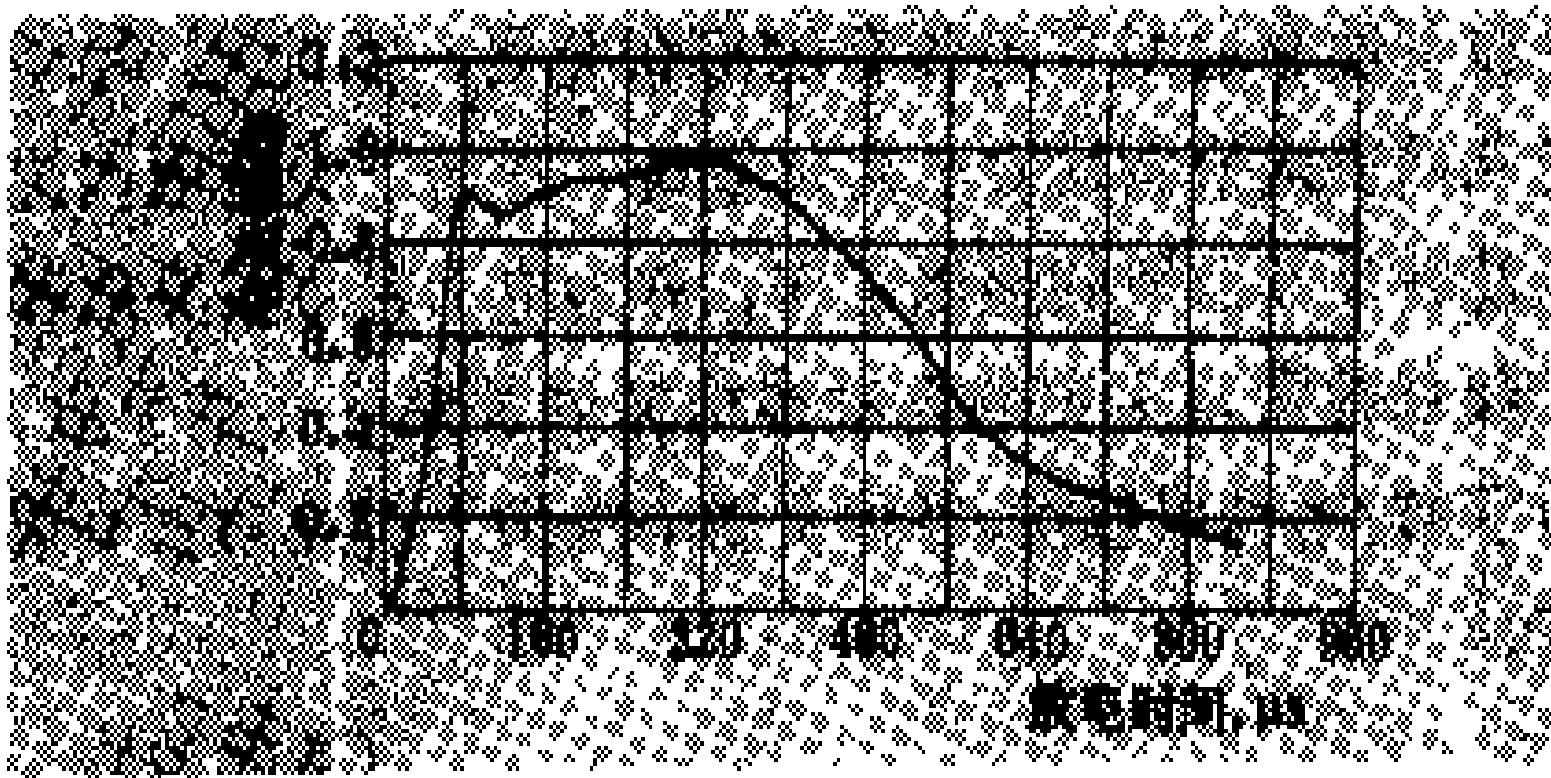


图2 正极性放电电流波形

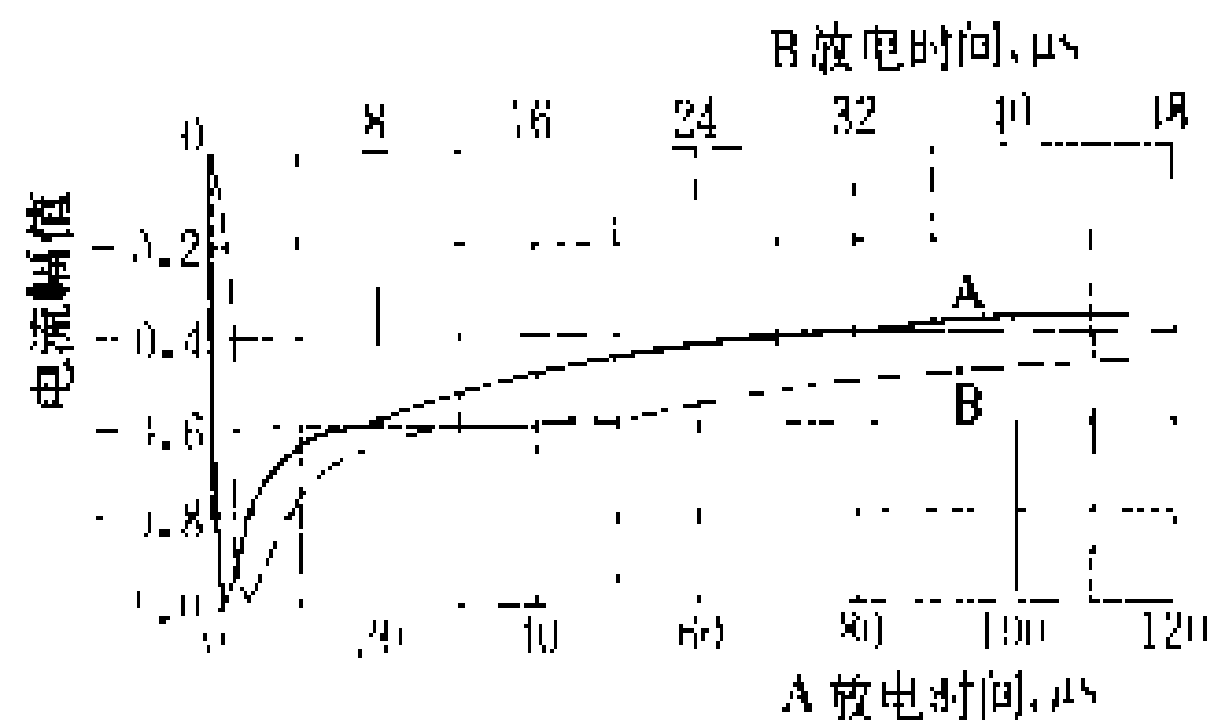


图3 随后负放电平均电流波形  
A—完整波形；B—放大的波前

典型的雷电流波形通常用双指数来描述

$$i = I_0(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1)$$

式中  $I_0$  为雷电流幅值。综合各国观测结果，约 85% 的雷电流波头长度在  $1 \sim 5 \mu s$  之内，平均为  $2.5 \mu s$ ，中国平均为  $2.6 \mu s$ 。雷电流波长在  $20 \sim 100 \mu s$  之内，平均约为  $50 \mu s$ 。

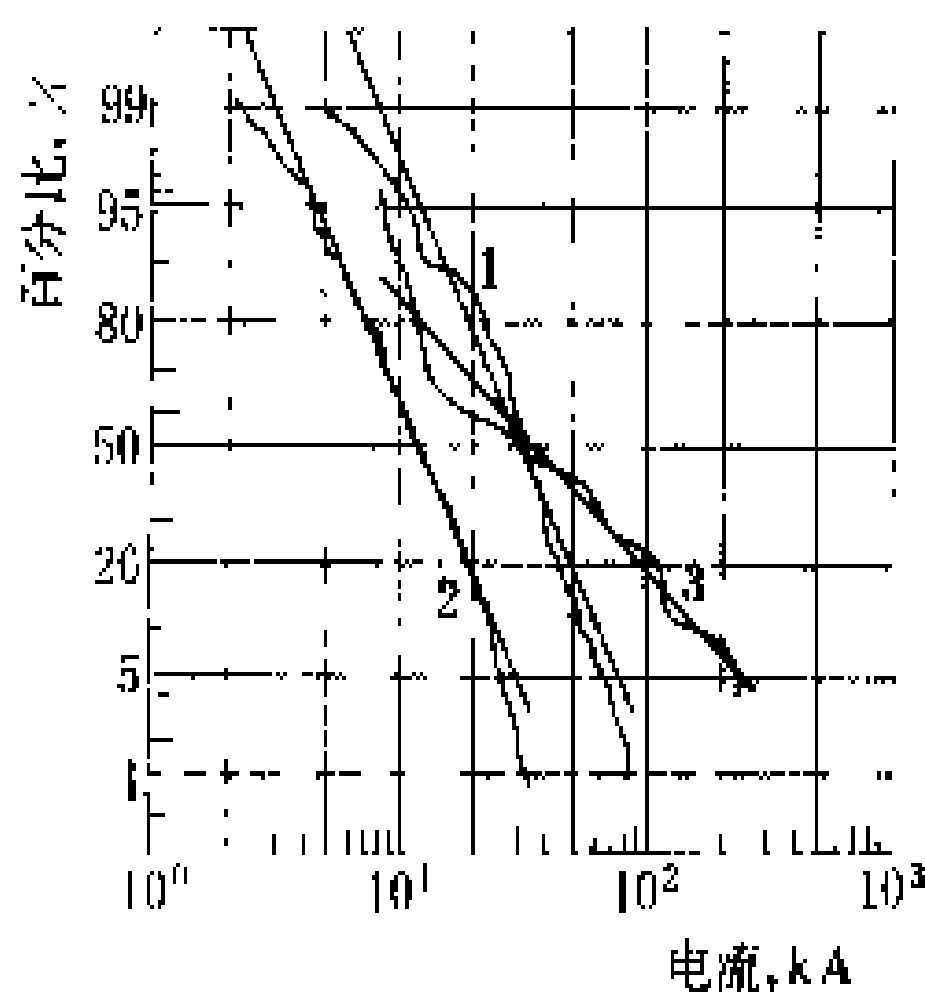


图4 圣萨尔瓦托山总计 127 次雷击的雷电流幅值概率分布  
1—第一次负放电；2—随后负放电；3—正放电

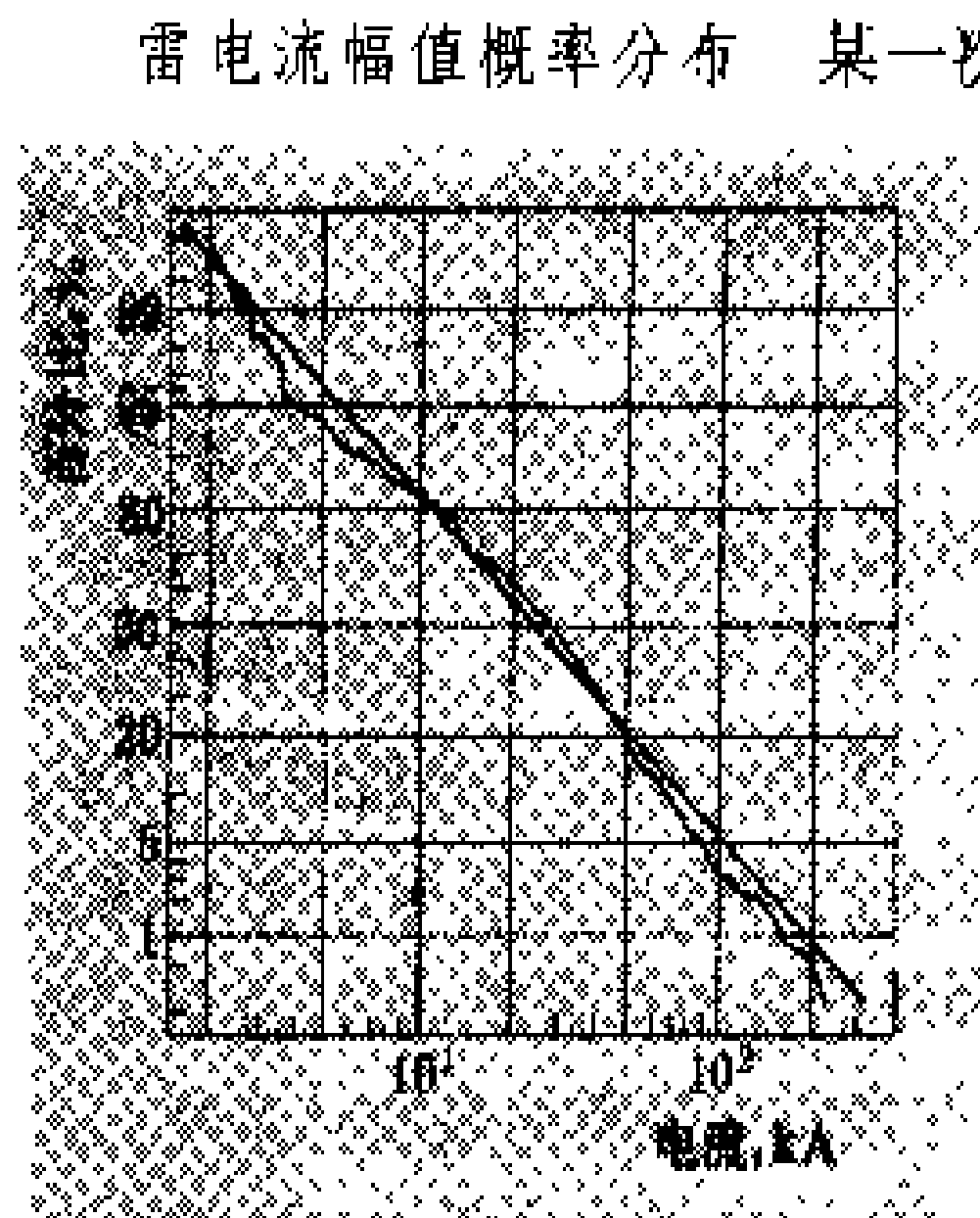


图5 F. 波波兰斯基 624 次正、负极性雷电流幅值概率分布

雷电流幅值概率分布 某一次雷击的电流幅值是随机的，对大量实测的雷电流幅值进行统计分析，可得其概率分布曲线。不同地区的雷电流幅值的概率分布不同，这主要与地区的地形、地貌、气象和雷暴强度有关。

图 4 为贝格尔在圣萨尔瓦托山 (Mount San Salvatore) 上记录

到的 101 次负极性放电和 26 次正极性放电第一次放电电流幅值的概率分布；图 5 为 F. 波波兰斯基 (F. Popolansky) 汇总了世界各地 624 次正、负极性第一次放电电流幅值的概率分布；图 6 为 J. G. 安德森 (J. G. Anderson) 综合美国观测结果的雷电流幅值概率分布。由图可见，概率曲线遵循对数正态分布规律。

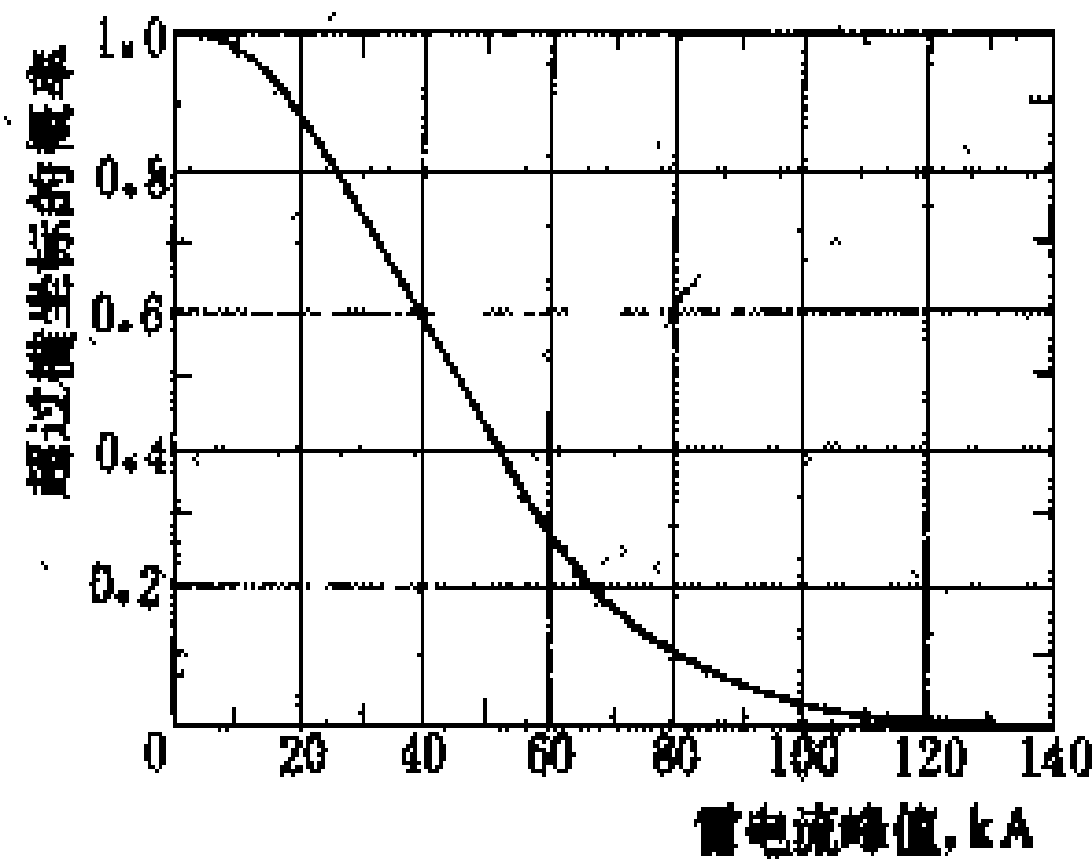


图6 J. G. 安德森综合美国观测的雷电流幅值概率分布

中国在 1972 年收集了 1205 个观测数据，得到雷暴日超过 20 的地区雷电流幅值的概率分布为

$$\lg P = -\frac{I}{108} \quad (2)$$

式中  $P$  为雷电流幅值超过  $I$  的概率； $I$  为雷电流幅值，kA。对 20 雷暴日及以下地区，概率分布将减小，即  $\lg P = -\frac{I}{54}$ 。

雷电流陡度概率分布 贝格尔在圣萨尔瓦托山上的观测结果如图 7。

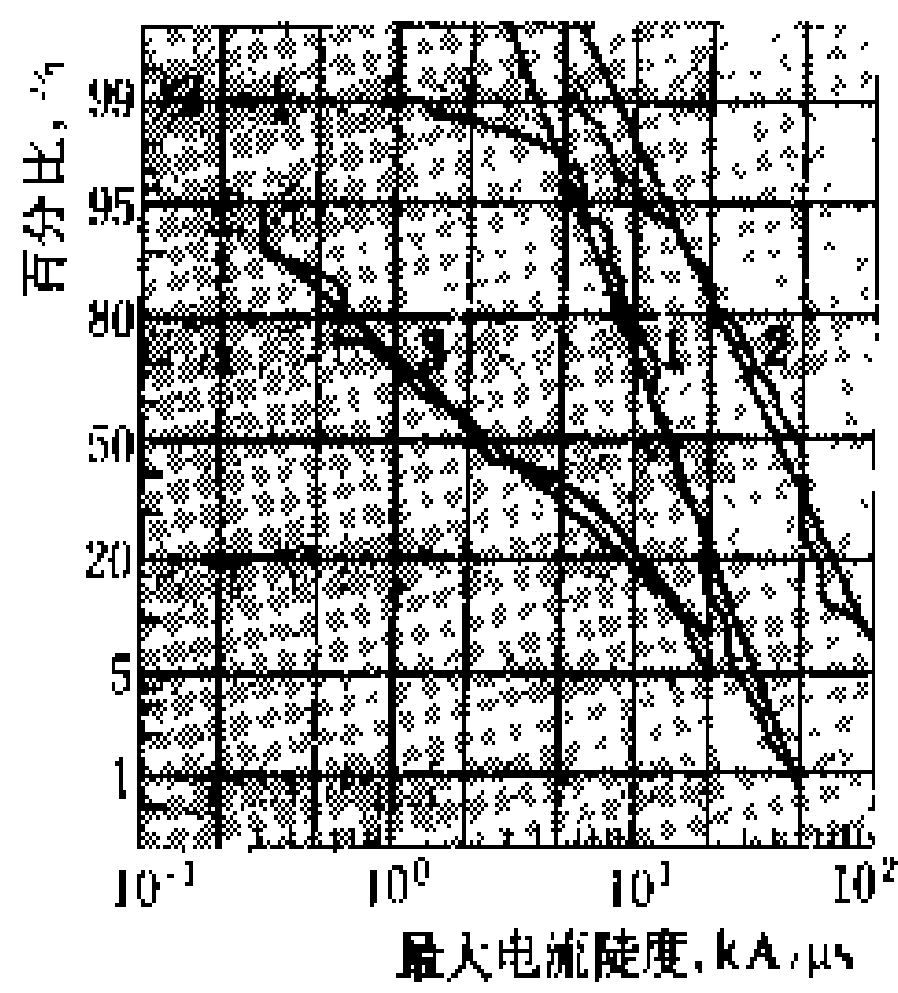


图7 圣萨尔瓦托山上的雷电流最大陡度概率分布  
1—第一次负放电；2—随后负放电；3—正放电

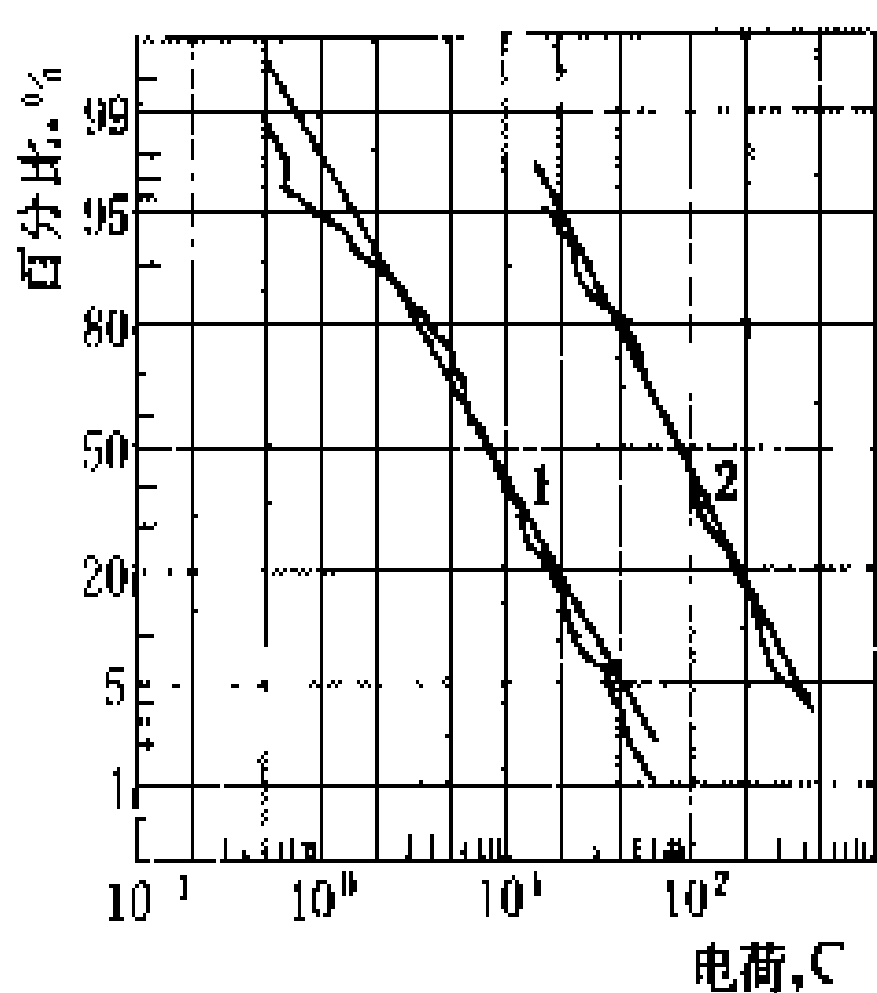


图8 放电电荷的累积概率分布  
1—负极性放电；2—正极性放电

中国采用

$$\lg P_s = -\frac{a}{54} \quad (3)$$

式中  $P_s$  为雷电流最大陡度超过  $a$  的概率； $a$  为雷电流最大陡度，kA/ $\mu s$ 。 $a$  和  $I$  的相关系数  $\gamma = +0.6$ ，为密切相关。

雷电流极性

当雷云电荷为正时，所发生的雷云放电为正极性放电，雷电流极性为正，反之，雷电流极性为负。实测统



计资料表明:不同的地形地貌,雷电流正负极性比例不同,负极性所占比例在75%~90%之间。

重复放电次数及对地输送的电荷量 在一个雷云单体中,常常有多个电荷密集中心,因此,一次雷云放电也常常包含多次放电脉冲,称多重放电。根据6000

次实测统计,平均重复放电2~3次,最多42次。放电之间的间歇时间通常为30~50 ms,最短为15 ms,最长达700 ms,而且间歇时间随放电数增多而加长。累计每次全放电过程对地输送的电荷量称放电电荷,每次闪击对地输送的电荷量称闪击电荷。贝格尔1975年发表的在圣萨尔瓦托山上测到的放电电荷

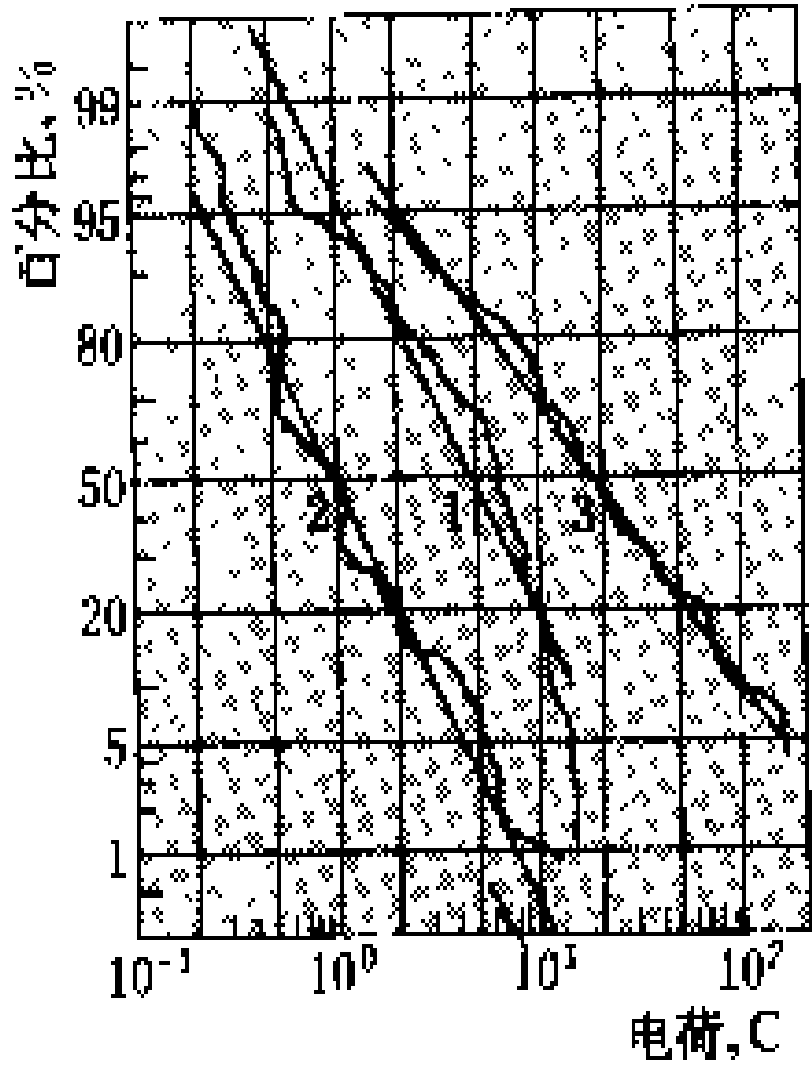


图9 闪击电荷的累积概率分布

1—第一次负放电;2—随后负放电;3—正放电

和闪击电荷的累积分布如图8和图9所示。

参考书目

刘继著,电气装置的过电压保护,北京:电力工业出版社,1982

Golde R H. Lightning. Academic Press, 1977

(吴璞三)

leidian dingwei xitong

雷电定位系统 (lightning location system, LLS) 见雷电观测站。

leidian guance

雷电观测 (lightning survey) 雷电观测内容包括雷云起电、雷云放电的发展过程和雷云放电的参数。由于云间放电几乎不对电力系统产生危害,所以雷电观测的主要对象是雷云对地放电。

雷电观测主要采取野外大面积观测和建立固定的雷电观测站两种方法。在输电线路大量装设磁棒是野外大面积观测的主要方法之一。建立固定的雷电观测站是对雷电放电进行全面研究的主要方法。

1897年英国人H. H. 霍弗特(H. H. Hoffert)和1902年德国人B. 瓦尔特(B. Walter)开始使用胶卷移动照相法进行雷电观测。早期雷电观测的主要仪器和设备有磁棒、电花仪、雷电流特性记录仪、阴极射线示波器、陡度仪等。20世纪50~60年代有高速摄影机、变像仪、雷电计数器等。随着微电子技术的高速发

展和宇航事业对雷电预警的迫切需要,20世纪70年代末期美国研制成雷电定位系统,开始了大范围内雷电发展及其参数的遥测工作,并为电力系统雷害故障点和森林雷电火灾的自动巡检提供了现代化的手段,为宇航、军民航空、导弹发射等提供了有效的雷电预警。

(吴璞三)

leidian guancezhan

雷电观测站 (lightning survey station)

集中多种仪器对雷云放电进行观察、直接测量和遥感测量的场所。有固定的和移动的两种,大多数是固定观测站。雷电观测站的观测内容包括观察雷云起电和雷云放电的物理现象,测量雷电流的波形、陡度、幅值和极性等多种雷电参数。

雷电观测的主要设备 除磁棒等仪器外,还有阴极射线示波器、分流器、感应线圈、雷电定位系统等主要设备。

阴极射线示波器 记录雷电流波形的仪器,通常示波管的加速电压为20 kV。20世纪70年代开始使用数字存储示波器,从存储信息中提取雷电流波形。

分流器和感应线圈 分流器主要用于针式观测塔的雷电流测量。感应线圈除用于针式观测塔外,还常用于电视塔等大塔体的雷电流测量。

雷电定位系统 美国的E. P. 克里德(E. P. Krider)和M. A. 尤曼(M. A. Uman)等人在20世纪70年代中期试制成功了雷电定位系统(LLS),对一定范围内的

雷云对地放电作定位探测,并测量雷电流幅值和极性等参数。

(1) 雷电定位系统原理。其原理框图如图1所示,它由两个以上的定向仪

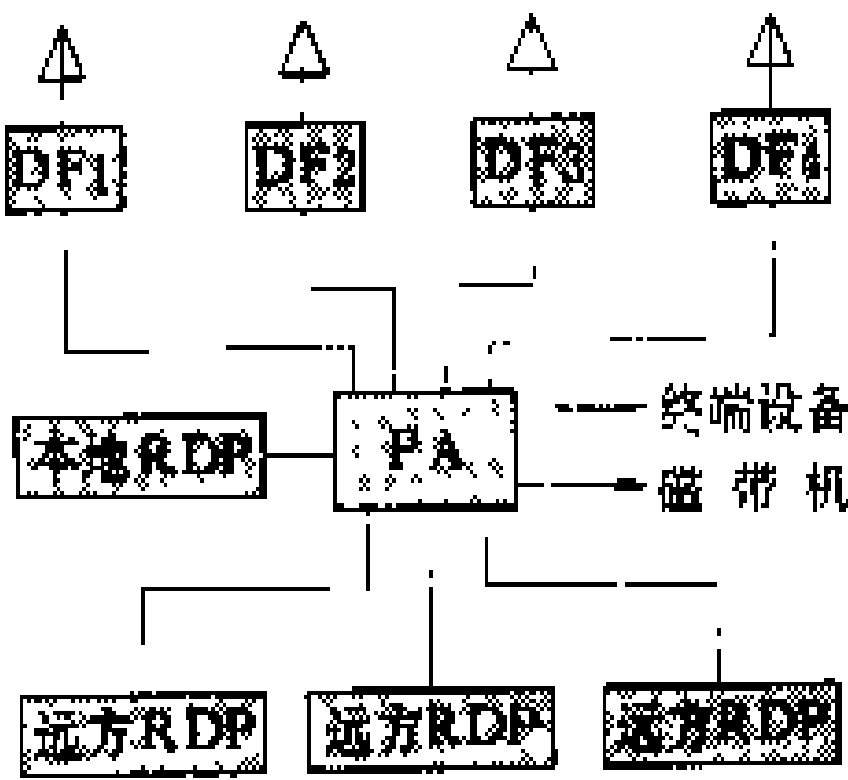


图1 雷电定位系统原理框图

(DF)、位置分析器(PA)和若干个本地或远方显示处理器(RDP)组成。它们之间大都相距几十甚至几百千米,可用各种通信方式把它们连接起来,组成一个庞大的遥测网。DF、PA和RDP除了各自独立功能所需的电路和终端设备外,都包含有预编程序的微型计算机,使得雷电定位系统成为一套计算机在线雷电探测的高技术系统。

(2) 定向仪定向原理。定向仪天线是由二个正交的框形天线组成,如图2所示。雷云对地放电通道在离地100~200 m时,主放电通道近似垂直地面。设在东西向和南北向天线里接收到的磁场强度分别为 $H_{we}$

和  $H_{NS}$ , 根据  $\tan \alpha = H_{NS} / H_{WE}$ , 即可求得雷击点对定向仪的方位角  $\alpha$ 。

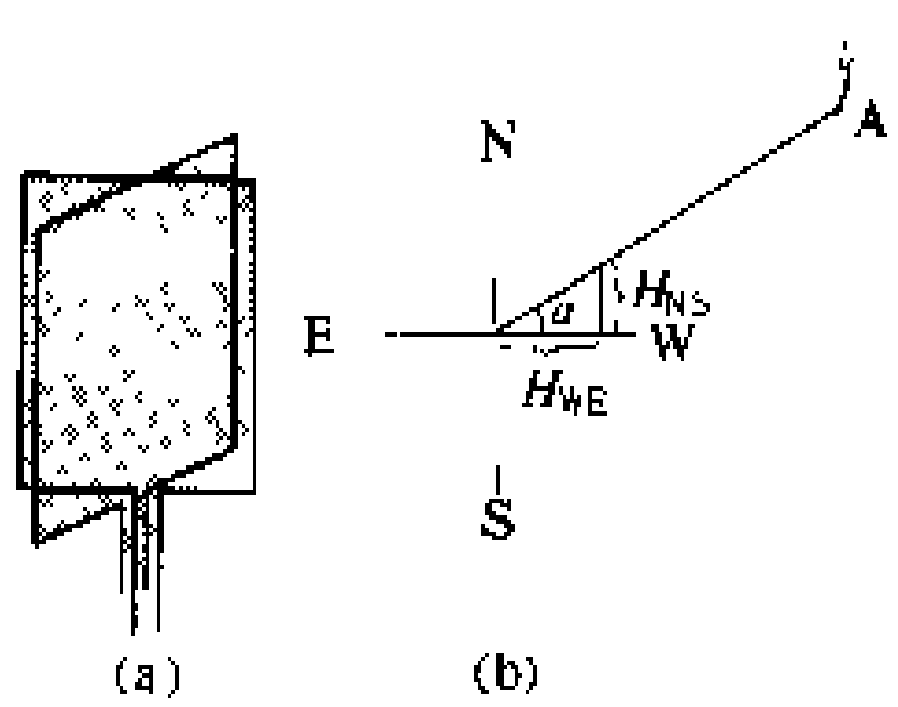


图 2 定向仪定向原理

(a) 正交矩形天线; (b) 定向原理

定向仪中的系列逻辑波形判别电路, 使定向仪仅对主放电作出响应。典型的云间放电和对地放电电磁场波形如图 3 所示, 它们的主要区别有: ①对地放电有明显的波前突变  $R$ , 并在  $R$  之后出现主峰  $P_1$ , 次峰  $P_2, P_3, \dots$  一般小于  $P_1$ ; 云间放电没有  $R$  突变, 有多个波前次峰。

②对地放电没有或仅有很小的负过冲, 云间放电有较大的负过冲。当脉冲形状逻辑判别电路接收的磁场信号满足: 上升时间在  $1 \sim 24 \mu s$  之间, 峰值之后  $20 \mu s$  之内不改变极性,  $20 \mu s$  之内次峰不大于 1.25 倍主峰时, 则信号被确认为对地放电而被接收。同时, 判别电路在第一主峰时取样, 这时回击通道在离地  $100 \sim 200 m$  的高度上, 通道近似垂直地面且无分支, 电离层的反射波也未到达,

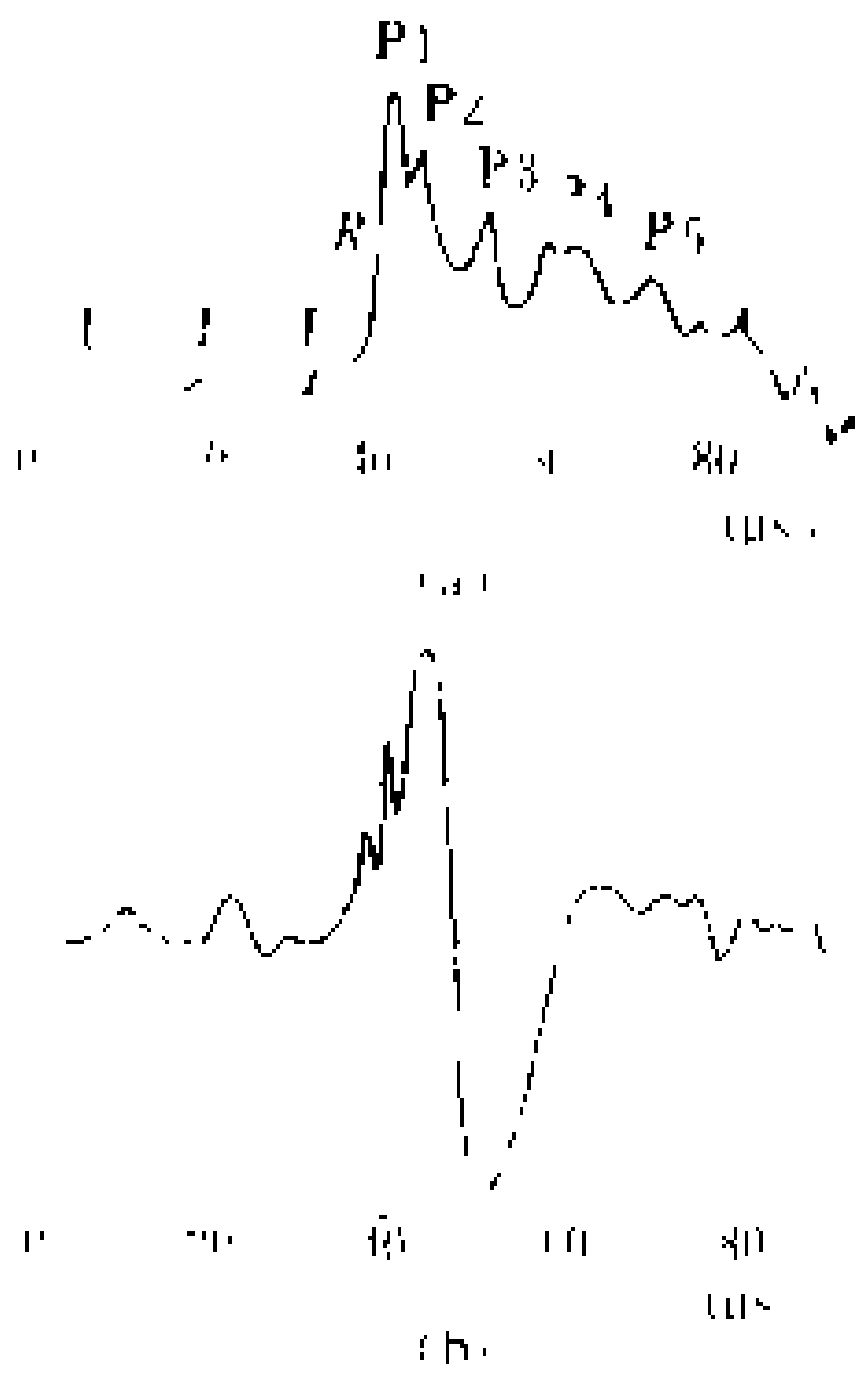


图 3 云间放电、对地放电电磁场波形

(a) 对地放电; (b) 云间放电

使分枝放电的水平磁场和电离层的反射不产生定向误差。这些判据区别于其它雷电定向技术, 使定向误差不超过  $1^\circ$ 。

(3) 三角定位原理和有效覆盖范围。如图 4 (三个 DF 系统) 所示, 设在点 A 发生对地放电, 每个 DF 站测定各自的方位角  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  (以正北方向为零度, 顺时针取向), 若各 DF 站址已知, PA 即可把雷击点 A 的位置计算出来并打印输出。每个 DF 站可整定一个有效探测半径  $r$  (由 DF 探测灵敏度决定), 二个 DF 站共同有效探测部分是定位系统的有效覆盖范围 (如图 4 中粗黑线包围部分)。DF 站越多, 覆盖面积越大。目前 LLS 最多能设置 16 个 DF 站, 当  $r=200 km$  时, 雷电定位系统有很大的覆盖面。

(4) 远方显示处理器。它接收 PA 的输出, 存储并在彩色屏幕上显示雷击点, 是 PA 的在线监视器, 在覆盖范围内可在多个用户 (如宇航中心、机场、电力调度

中心、森林火灾检测中心等) 设置, 以形成庞大的监视网。

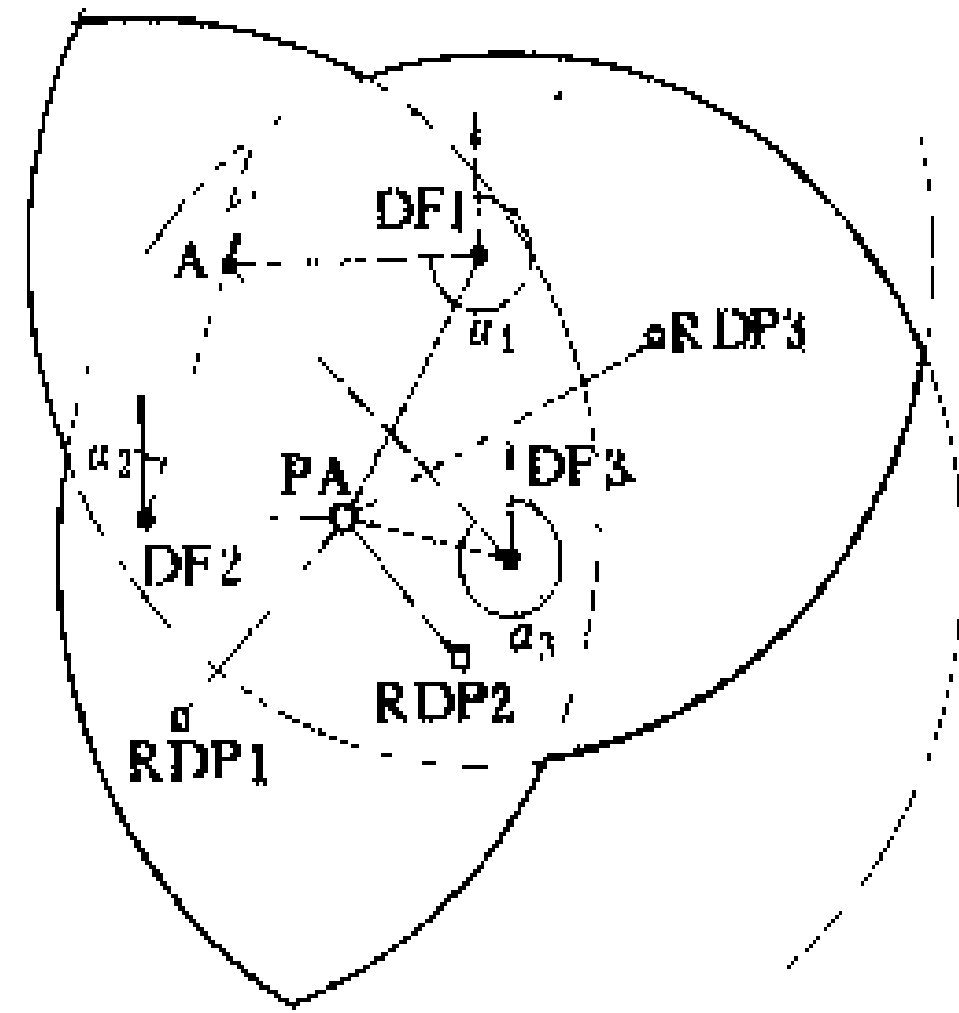


图 4 三角定位原理和有效覆盖范围

PA 输出每次对地放电的发生时间、地点、雷电流幅值、极性、回击次数等参数, 并由此计算出某一地区的雷电流幅值概率分布、雷暴日、雷暴小时和地面落雷密度。

**国外雷电观测站实例** 主要介绍美国纽约帝国大厦观测站、瑞士圣萨尔瓦托山观测站、南非观测站、莫斯科电视塔观测站和中国石榴岗观测站。

(1) 美国纽约帝国大厦观测站。建于 1939 年, 高  $380 m$ , 当时由 K. B. 麦凯克伦 (K. B. McEachron) 主持。第一次使用凹孔放电管示波器和磁钢棒, 测量雷电流波形和幅值。在  $780 m$  远处使用波依斯旋转照相机拍摄雷云放电发展过程。拍摄的照片首次展示了由楼顶发展起来的向上先导引发的上行雷。

(2) 瑞士圣萨尔瓦托山观测站。位于北纬  $45^\circ 59'$ 、东经  $8^\circ 57'$ , 标高  $914 m$ , 1943 年建成第一个  $60 m$  高的木质塔, 1958 年改用等高的无线电发射塔。1950 年建成第二座  $90 m$  高的铁塔, 当时由 K. 贝格尔 (K. Berger) 主持观测工作。在两个塔上均装设了响应时间为  $16 ns$  的分流器和分辨率为  $0.5 \mu s$  的专用阴极射线示波器。1950 年采用 8 架莱卡照相机进行全视野夜间照相。1967 年采用电场仪记录电场变化。从 1946 ~ 1974 年共记录到 1786 次雷电流示波图, 拍摄了清晰的放电发展过程的照片, 首先发现了脉冲正电流雷电。

(3) 南非观测站。1973 年在南纬  $25^\circ 50'$ 、东经  $28^\circ 0'$  的一座小山上建立一座  $60 m$  高的绝缘塔, 由 R. B. 安德森 (R. B. Anderson) 主持观测工作。塔下安装有阴极射线示波器, 照相机和电视摄影机均在远处用甚高频无线电设备遥控进行观测。用电视摄影廉价地获得了大量雷云放电发展过程的资料, 可用以确定雷云放电的一般特性。

(4) 莫斯科电视塔观测站。位于北纬 55°45′、东经 37°40′,塔高 537 m,用感应线圈和示波器测量雷电流。建站以后的四个半雷季中,遭雷击 143 次,平均每年 32 次,有一次雷暴中遭 12 次雷击。观测结果表明所遭受的雷击的主要特征是:多数雷击为上行雷,其中一部分雷击起始于塔下方 12~36 m 处,有二次雷击打在塔顶下方 200~300 m 之间;高大塔体具有吸引雷击的效果,即除塔体本身吸引雷击外,距塔体 1 km 之内比 1~3 km 范围内的对地放电数要多。

(5) 中国石榴岗观测站。1960 年建于中国广东省广州市东南郊的石榴岗,站上建有高 45 m 木质塔一座,在塔顶装有总长约 2500 m 的环形直击雷接收网,环形面积约 350000 m<sup>2</sup>。用分流器和阴极射线示波器记录雷电流波形,用磁钢棒记录雷电流幅值和沿辐射接地体的电流分布,用电容分压器测量塔顶电位,用旋转照相机拍摄放电发展过程,还装有水平天线电场仪和框形天线磁场仪。6 年观测期间雷击塔体 5 次。

参考书目

Golde R H. Lightning. Academic Press, 1977  
(吴璞三)

leidian guodianya

**雷电过电压** (lightning overvoltage) 雷云放电时在导线或电气设备上所形成的过电压。雷电过电压分直击雷过电压和感应雷过电压两类。雷电直击于电力系统(导线、设备等)时产生的过电压称直击雷过电压。直击雷过电压对任何电压等级的线路和设备都是危险的。雷击于导线或电气设备附近时,由于静电和电磁感应而在导线或电气设备上形成的过电压称感应雷过电压。感应雷过电压只对 35 kV 及以下电压等级的线路和设备构成威胁。

输电线路受雷击的次数以每年每百公里的雷击总数  $N$  表示。在中国,对于平均高度小于 20 m 的输电线路,取  $N=0.015 hT$ 。式中  $h$  为线路的平均高度, m;  $T$  为每年平均雷暴日数。对于  $h \geq 20$  m 的线路,可取  $N=0.0015 (32.6 h^{0.61}+W) T$ , 式中  $W$  为双避雷线的宽度, m。

构筑物受雷击的次数以每年的雷击总数  $N_1$  表示。在中国,高度  $h < 20$  m 的构筑物,取  $N_1=1.5 \times 10^{-8} (A+10h) (B+10h) T$ , 式中  $A$  及  $B$  分别为构筑物的长和宽, m。对于  $h \geq 20$  m 的构筑物,可取  $N_1=1.5 \times 10^{-8} (A+32.6 h^{0.61}) (B+32.6 h^{0.61}) T$ 。

(解广润)

leiji tiaozhalu

**雷击跳闸率** (outage rate due to lightning

stroke) 每百公里线路每年(一般以 40 雷暴日计)由雷击引起的跳闸次数。它是线路防雷可靠程度的重要指标。在中性点有效接地系统中,当雷击引起的绝缘子对地闪络转变为稳定的工频电弧时,可造成线路的跳闸。在中性点非有效接地系统中,只是在雷击引起两相绝缘子的相间或对地闪络时,才会造成线路的跳闸。

雷击跳闸率  $n$  由雷击杆塔的跳闸率  $n_1$  和雷击导线的跳闸率  $n_2$  组成,  $n_1$  和  $n_2$  可由下式求出

$$n_1=\gamma Th_g P_{I_1} \eta$$

$$n_2=\gamma Th_g P_g P_{I_2} \eta$$

式中  $\gamma$  为每雷暴日每平方公里的平均落雷次数;  $T$  为每年雷暴日数;  $h_g$  为避雷线的平均高度, m;  $P_{I_1}$  为雷电流超过  $I_1$  (雷击杆塔时线路的耐雷水平) 的概率;  $P_{I_2}$  为雷电流超过  $I_2$  (雷绕击于线路时线路的耐雷水平) 的概率;  $g$  为雷击杆塔顶部(及其直接附近的避雷线) 的次数与雷击线路总次数之比, 也称击杆率;  $P_g$  为雷绕过避雷线击于输电线的概率, 也称绕击率;  $\eta$  为由冲击闪络转变为稳定工频电弧的概率, 也称建弧率。

(陈慈萱)

Leinadi dagongliu shiyanzhan

**雷纳第大功率实验站** (high power laboratory at Les Renardieres) 属于法国电力公司, 位于巴黎市南 56 km 处, 建成于 1974 年。该实验站的电源来自附近的谢斯诺(chesnoy) 枢纽变电所和站内的冲击同步发电机。谢斯诺变电所经 6 km 双回 400 kV 线路向实验站供电, 三相短路功率为 12000 MV·A, 两相短路功率为 6000 MV·A, 实验站可使用的功率为上述功率值的一半。

该实验站有冲击同步发电机 2 台, 每台出线端初始三相短路功率为 6600 MV·A, 额定试验容量为: 三相 3000 MV·A、单相 1860 MV·A, 额定电压为 14 kV (50 Hz 时) 或 15.5 kV (60 Hz 时)。站中共有变压器 17 台: 自耦变压器 4 台, 每台的短路功率为 2500 MV·A、电压为  $(380/\sqrt{3})/(225/\sqrt{3})$  kV; 发电机变压器 3 台, 每台短路功率为 2000 MV·A、电压为  $(14/\sqrt{3})/(225/\sqrt{3})$  kV; 试验变压器 4 台, 每台短路功率为 2500 MV·A、电压为  $(225/\sqrt{3})/(4 \times 35)$  kV (有 25 kV 抽头); 另有试验变压器 6 台, 每台短路功率为 750 MV·A, 电压为  $(225/\sqrt{3})/(2 \times 15 + 2 \times 10)$  kV。合成试验电压源主电容器组储能为 10 MJ, 是世界上最大的电容器组, 可对 420、765、1200 kV 级断路器进行整极试验(对称接线)。试验主回路及变压器二次绕组的换接均使用遥控隔离开关。为了试验的安全, 试品间的隔离开关和接地开关采用



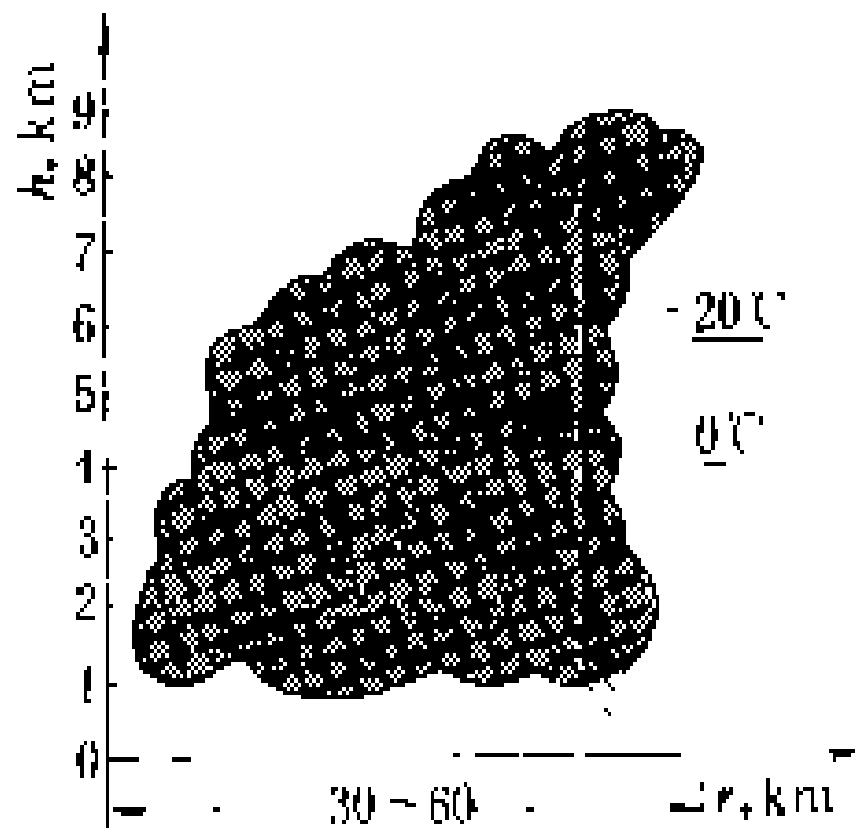
手动操作。遥控隔离开关由记忆装置自动控制,也可手动控制。运行人员通过信号灯指示、计算机和电视,监视试验过程。测量室紧邻试品间,测量全部采用模拟数字转换系统完成。

(顾宽鸿)

leiyun

**雷云** (thunder-storm cloud) 能产生雷闪电放电的积雨云。在雷雨季节,太阳使地面水分部分化为蒸汽,同时地面空气受到热地面的作用变热而上升,成为热气流。由于太阳几乎不能使空气直接变热,所以每增高1 km 空气的温度约下降10℃。上述热气流遇到高空的冷空气时,水蒸气就凝成小水滴,形成热雷云。此外,水平移动的冷气团或暖气团,在其前锋交界而上也会因冷气团将湿热的暖气团抬高而形成面积很大的锋面雷云。雷云的带电过程是综合性的。强气流将云中水滴吹裂时,较小的水珠带负电,而较大的残滴带正电,小水珠被气流携走,于是云的各部分带有不同的电荷。此外,水在结冰时,冰粒上会带正电,而被风吹走的剩余的小水珠将带负电。雷云的带电过程也可能和它们吸收离子、相互撞击或融合的过程有关。实测表明,在离地面而5~10 km 的高度主要是带正电荷的云层,在离地面1~5 km 的高度主要是带负电荷的云层,但在其底部也往往有一块不大区域的正电荷聚集(见图)。雷云中的电

荷分布也远不是均匀的,往往形成好多个电荷密集中心。每个电荷中心的电荷约为0.1~10 C,而一大块雷云同极性的总电荷则可达数百库仑。雷云中的平均电场强度约为150 kV/m,而



雷云电荷分布图

在雷电放电时可达340 kV/m。雷云下面地表的电场强度一般为10~40 kV/m,最大可达150 kV/m。当云中电荷密集处的电场强度达到2500~3000 kV/m 时,就会发生先导放电。大部分雷云放电是在云间或云内进行的,只有小部分是对地发生的。雷云对地的电位可高达数千万伏到上亿伏。

(解广润)

leiyun fangdian guocheng

**雷云放电过程** (lightning discharge process) 最常见的雷云放电是带负电的雷云向下放电的线状雷电。当雷云中电荷密集处的电场强度达到2500

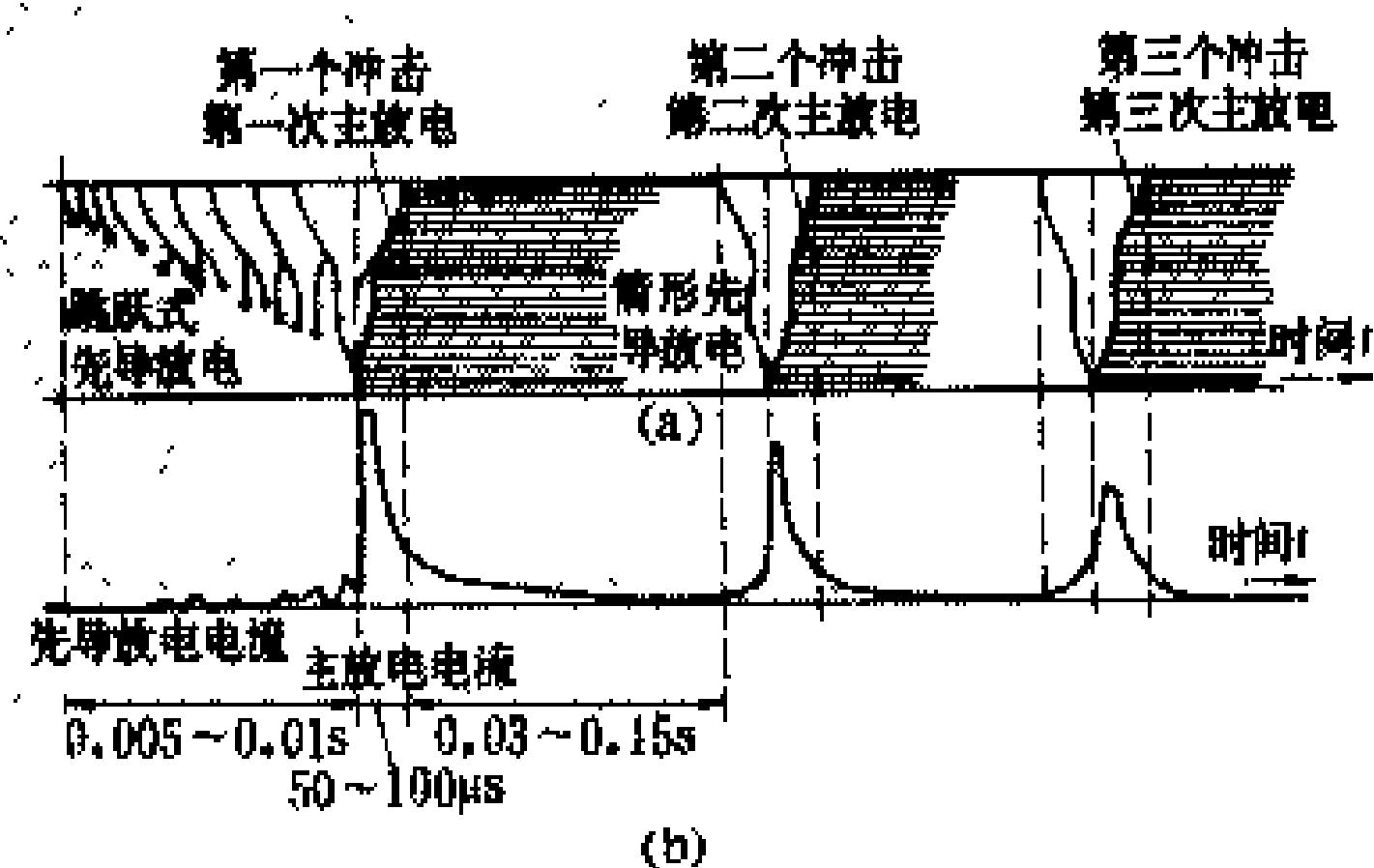
~3000 kV/m 时,将首先出现向下发展的放电,这种放电称为先导放电。由负雷云向下发展的先导是跳跃式前进的,即走一段停一会儿,再走一段,再停一会儿。每级的长度为10~200 m,平均为25 m。每级停歇的时间为10~100 μs,平均为50 μs。先导每级发展的速度约为10<sup>7</sup> m/s,延续时间约1 μs,总的平均速度为(1~8)×10<sup>5</sup> m/s。从先导的光谱分析可知,先导发展时其中心温度可达3×10<sup>4</sup> K,而停歇时约为10<sup>4</sup> K。先导中心的线电荷密度约为(0.1~1)×10<sup>-3</sup> C/m,先导的电晕半径约为0.6~6 m。相应先导发展时的电流约为100 A。先导中的纵向电位梯度约为100~500 kV/m。下行负先导在发展中会分成数支,这和空气中原来随机存在的离子团有关。当先导接近地面时,地面较突出的部分会开始迎着它发出向上的放电,这种放电称为迎面先导。迎面先导可以是一个,也可以有几个。当迎面先导的一个与下行先导的一支相遇时,就会产生强烈的中和效应,出现极大的电流(数十到数百千安),并伴随有雷鸣和闪光,这就是雷云放电的主放电阶段。主放电存在时间极短,约为50~100 μs。主放电电流的波头时间约0.5~10 μs,平均时间约为2.6 μs。主放电过程是逆着负先导的通道由下向上发展的,速度为光速的1/20~1/2,离开地面愈高则速度愈小,其平均值约为光速的0.175倍。主放电到达雷云时就结束了,然后云中的残余电荷经过主放电通道流下来,称为余光阶段。由于云中的电阻较大,故余光阶段对应的电流不大(约数百安),持续的时间却较长(0.03~0.15 s)。

雷云中可能存在着几个电荷中心,在第一个电荷中心完成上述放电过程之后,可引起第二个、第三个中心向第一个中心放电,因此雷云放电通常是多重性的,每次放电相隔时间约0.6 ms 到0.8 s(平均为65 ms),放电的数目平均为2~3个,最多记录到42个。第二次及以后的放电,由于是沿着第一次放电的游离通道进行的,所以能自上向下顺利连续发展,没有先导的停歇现象,但主放电仍然是由下向上发展的,而且放电电流一般较小,不超过30 kA。

先导放电首先由雷云发生并向下发展到地面的雷云放电现象称为下行雷。图中所示为负雷云的下行雷过程,图中(a)为用高速摄影机拍得的光学照片描绘图,图(b)为相应的电流变化情况。正雷云的下行雷过程与上述过程基本相同,但下行正先导的逐级发展是不明显的,其主放电有时有很长的波头时间(几百微秒)和很长的波尾时间(几千微秒)。

当地面有高耸的突出物时,不论正负雷云都有可能由突出物上行的先导向发展到雷云的放电现象,这种雷云放电叫上行雷。上行雷的主放电电流一般小于10~20 kA。

见雷电。



负雷云下行雷的过程

(a) 负雷云向下放电的光学照片描绘图；

(b) 放电过程中雷电流的变化情况

### 参考书目

[美] 戈尔德著，雷电，周诗健等译，北京：电力工业出版社，1982

(Golde R H. Lightning. Academic Press, 1977)

解广润主编，电力系统过电压，北京：水利电力出版社，1991

(解广润)

lengshuo dianlan zhongduan

**冷缩电缆终端** (prestretched tube terminal, PST terminal) 用乙丙橡胶、硅橡胶或三元乙丙橡胶加工成管材，经扩张后，内壁用螺旋形尼龙条支撑的一种电缆终端。冷缩电缆终端在安装时只需将管子套上电缆绝缘线芯，拉去支撑尼龙条，管子靠橡胶的收缩特性，紧缩在电缆芯上。一般用作 35 kV 及以下固体挤压聚合电缆线路的终端，特别适用于严禁明火的场所，如矿井、化工区及炼油厂等。20 世纪 70 年代，美国在发展热缩电缆终端的基础上，同时发展了冷缩电缆终端，以适应不能用明火安装电缆终端的场合，得到普遍推广。但由于紧缩界面间的气隙未能全部排除，目前冷缩电缆终端只用在 35 kV 及以下电压等级的电缆线路中。

冷缩电缆终端的弹性记忆机理与热缩电缆终端的不同，它是依靠橡胶的物理性能，保持扩张后的机械内应力，直至移去螺旋形支撑条，靠橡胶内应力的平衡紧贴于电缆芯上，因此需要紧缩的部件可能用多根支撑条，如三叉手套共需大小四根螺旋形支撑条。

冷缩电缆终端一般也作成多种零部件，在现场组装而成，它不用传统电缆终端的瓷套管、电缆胶、底盘、外壳等笨重部件。因此，冷缩终端非常紧凑轻巧，工艺简单省时，避免加热用的明火。它的主要部件有应力控制带、绝缘套管、三叉手套等。

应力控制带 用非线性电阻率的高分子材料制成

带子，绕包在电缆绝缘层表面，代替传统电缆终端中的电缆应力锥，也不需象热缩电缆终端的应力管那样要用明火加热收缩。它不但简化了现场安装工艺，并且缩小了电缆终端的外形尺寸，便于安装在紧凑的电气设备中。

**绝缘套管** 用橡胶聚合物压制或如瓷套管的模铸件，但内孔直径略小于需要套入电缆线芯绝缘的外径。制造厂将其内径扩张后放进尼龙支撑条，也可在现场安装就地进行内径扩张，套上电缆芯。室内用的绝缘套管，一般不带伞裙，以便安装在紧凑的电气设备中。

**三叉手套** 见热缩电缆终端。

(李裕芬)

lianxu dixian

**连续地线** (counterpoise) 由一个杆塔到另一个相邻杆塔之间互相连接的水平伸长接地体。连续地线一般采用两根互距约 10 m 的平行地线，以增加其可靠性。在土壤电阻率特别高的地区，当一般接地很难满足线路防雷要求时，可采用连续地线。连续地线一般可使杆塔的冲击接地电阻降到 30  $\Omega$  左右。

连续地线是 20 世纪 30 年代开始采用的一种防雷接地措施。加拿大、日本、苏联等国曾在 110~750 kV 线路上应用连续地线，取得较好的防雷效果。

(王 遵)

liangxian yidi zhi peidian

**两线一地制配电** (double wire-ground system for electric power distribution) 三相交流供电系统的一种特殊的供电方式。在中性点不接地的三相配电系统中，只用二相导线，第三相（一般取中间一相）在送电端和受电端分别可靠接地，以大地作为第三相导电回路。与这种以大地作为导电回路的供电方式相似的还有一线一地制配电，即将一相导线与大地组成供电回路，向单相用电设备供电。一线一地制只用于中性点接地的中压配电网。

特征 两线一地制供电方式的优点是：节约有色金属消耗量（平均每千米 10 kV 线路节约 100 kg，35 kV 线路节约 288 kg），降低配电网造价（比三线制供电线路节约造价平均为 18%~25%），减少线路电能损耗（平均约 20%）。但由于一相电流利用大地传送，接地相对地电压为零，而非接地相对地电压为线电压，致使三相对地电压不平衡，三相电流也不平衡。在正常运行情况下，两线一地制线路对邻近的通信线路产生电磁干扰和静电感应电压，严重影响通信线路的通信质量和人身安全。因此，在通信线路密集的城市地区或近郊区、或有重要通信线路的区段内的配电网，都不宜



采用两线一地制供电方式。此外,在接地相的接地极周围,长期存在接触电压和跨步电压的危险。为不致危及人畜的安全,两线一地制线路的接地电阻要按对地电压不超过 50 V 的要求选定,并需经常进行检查和监测。一线一地制配电也具有节约有色金属、降低造价和建设速度快等优点,同时也存在对通信线路产生严重干扰和危及人畜安全的缺点。

**应用** 两线一地制配电适用于线路延伸长、负荷密度小、利用小时低的农村配电网。一些东欧国家从 20 世纪 50 年代初开始,已在农村配电网中推广应用两线一地制供电方式。中国从 20 世纪 60 年代初,也先后在各地农村配电网建设中采用了两线一地制供电方式,对发展农村配电网,及早将电力送到边远地区起到了一定的促进作用。中国拥有的两线一地制线路最多时超过 80 万公里,采用的电压等级一般为 6~10 kV 和 35 kV 两种,但以 6~10 kV 配电线路为主。随着农村电气化的发展,农村通信网也逐步发展起来,两线一地制配电线路对通信线路干扰的问题日益突出。在农村配电网发展的同时,不少地区结合扩建和改造,将部分两线一地制线路改建成三线制,避免了对通信线路的干扰。但在边远地区农村配电网中也存在继续建设两线一地制配电线路的倾向。到 20 世纪 90 年代初,中国尚有 40 万公里以上的两线一地制配电线路。一线一地制配电在某些国家也被用于向边远农村地区供电。

**展望** 两线一地制配电的主要缺点是对通信线路干扰严重,事故跳闸率较高(中国的经验数据平均为三线制配电线路的 1.8 倍左右),三相电压和电流不平衡。当年,中国在国家和集体的投资能力尚不充裕的情况下,为尽早普及农村用电,促进农副业发展,提高人民物质文化生活水平,在一些影响不大或采取措施后能减少对通信线路的影响并能克服运行上的某些缺点的地区,两线一地制配电曾经得到发展。但是必须先从以下几方面进行经济比较以确定其合理性:①第一年内节约的配电网基建投资及金属消耗量;②今后几年内可能的发展规模和预期的节约效果;③预计五年内可能节约的线路电能损失量;④为改造通信网而增加的投资和金属消耗量;⑤为采用两线一地制而增加的接地装置及其它技术措施费和金属消耗量;⑥提前实现农村供电的社会经济效益。

从长远着眼,两线一地制配电实质上应看作是一种权宜的、过渡的措施。对资金和物资条件允许,以及不宜采用两线一地制配电的地区,径直采用三线制配电是更为合适的。

中国在农村迅速发展,乡镇企业普遍兴起,以及通信线路四通八达的情况下,能够适于新建两线一地制配电的地区已是极少的了,已建成的两线一地制配电

设施正在逐步改建为三线制配电,这将成为必然的发展趋势。

(陈致杰)

Leninggela Guoli Gongye Daxue gaodianya shiyanshi

**列宁格勒国立工业大学高电压实验室** (high voltage laboratory of Leningrad State Technical University)

列宁格勒国立工业大学位于苏联列宁格勒市南郊,原名列宁格勒工学院,简称 ЛПИ,1989 年改名后简称 ЛПТУ,是苏联设置高压教研室较早的学校。该校的高电压实验室建于 1958 年,大型设备均安装于户外试验场。主要设备有两组串级工频试验变压器,一台冲击电压发生器,三条试验线段和一个人工气候室。

第一组工频变压器为 2250 kV, 3.3 A;第二组为 2250 kV, 2 A。两组变压器均配有相应的附属设备,可以分别产生 3000 kV 及 2700 kV 频率可变的衰减振荡电压波,以模拟操作过电压,波前时间为 2000~5000  $\mu$ s。利用它们可以研究和试验超高压、特高压线路和变电所的相间绝缘以及开关设备断口间的绝缘。

试验场上还有 600 kV、3.3 A 的试验变压器一台,可作为湿试验及人工污秽试验的电源,亦可作为开关设备断口反相试验时的两个电源之一。

冲击电压发生器建成于 1983 年,额定电压为 7 MV,储能 560 kJ,主电容 22.8 nF,其最高输出电压为 6.1 MV 负雷电冲击波 (1.2/50  $\mu$ s) 和 3.9 MV 正操作冲击波 (1000/5000  $\mu$ s)。它安装在 30 m 高的绝缘塔内,上部有三个用直径 1 m 的管子做成的 12~16 m 的均压环。该冲击电压发生器在有露、雨及湿雪时均能正常运行。

主试验场的尺寸为 50 m×50 m,有 28 m×40 m (高) 及 36 m×36 m (高) 龙门架各一座。后者用来悬挂真型塔塔窗模型及其它悬挂式被试品。场内还立有三基转角塔及一基直线塔,作为悬挂悬垂型及耐张型绝缘子用。场内还建有三个试验线段:一个是用来研究 1150 kV 线路相对地及相间绝缘的线段,长 250 m;一个是用来研究 1800 kV 线路电晕损失、无线电干扰及生态影响的线段,长 400 m;第三个是用来研究 500 kV 三相紧凑型输电线路电气特性的线段,长 300 m。

简易污秽实验室为圆形塔,塔高为 20 m。

参见彩图插页第 45 页 131 图。

(徐士珩)

linjie dangju

**临界档距** (critical span) 见架空线力学计算。



Liujiaxia—Guanzhong shudian xianlu

刘家峡—关中输电线路 (Liujiaxia—Guanzhong transmission line)

中国自行设计、采用国产器材、自行施工的第一条 330 kV 超高压输电线路，简称刘天关线。设计输送容量为 420 MW。该线路起自甘肃省刘家峡水电站，经天水县秦安变电所，至陕西省关中地区汤峪变电所，全长 534 km，单回路。刘天段（刘家峡水电站至秦安变电所）275.5 km，海拔 1500~2500 m；天关段（秦安变电所至汤峪变电所）258.5 km，海拔 600~2300 m。这条线路为中国超高压输电线路的建设提供了成功的经验。

该线路交叉跨越重要通信线 13 处，35~110 kV 电力线路 7 处，铁路 2 处，河流 6 处。全线共有杆塔 1219 基，其中钢筋混凝土杆 358 基，铁塔 861 基。钢筋混凝土杆为预应力拔梢门型杆，杆径为  $\phi 230/590$  mm，杆高 27 m，由三段焊接组成，两杆柱间有叉梁。这种预应力拔梢门型杆用于平地 and 台地，不打拉线，可少占农田，同铁塔相比节约钢材 55%。全线共节约钢材约 1110 t。山地采用 67-1 猫头型直线塔、干字型耐张转角塔。重冰区采用门型铁塔。杆塔普遍采用钢筋混凝土预制基础，大转角和大跨越杆塔采用现浇基础（见杆塔基础）。

海拔 2000 m 以下线路导线采用二分裂 LGJ-300 钢芯铝绞线，分裂间距为 400 mm；海拔 2000 m 以上高海拔地区采用二分裂 K-272-1 型扩径导线以降低电晕损耗，导线截面为 300 mm<sup>2</sup>。重冰区采用二分裂 LHGJJ-300 加强型钢芯铝合金绞线（见分裂导线）。刘天段架空地线为满足载波通信需要，采用 GHJ-70 钢铝混绞线和铝包钢线。天关段架空地线为 GJ-70 镀锌钢绞线，关山重冰区架空地线采用 GJ-100 钢绞线。直线杆塔采用 XP-10 型瓷绝缘子，一般每串 20 片。耐张杆塔采用双串 XP-16 型高强度瓷绝缘子，一般每串 21 片。

施工中推广使用了双轮双吊内拉线抱杆组塔法（见杆塔组立），试验了张力放线和分裂导线调整弧垂等技术（见架线施工），并研制了一批新的施工机具和飞车等。

线路造价 9.15 万元/km，导线 8.1 t/km，架空地线 1.1 t/km，水泥 5.32 t/km，钢材 18.4 t/km，每公里施工用工量为 2828 工日。全线于 1972 年 6 月正式投入运行。

(胡维新)

liufuhualiu duanluoi

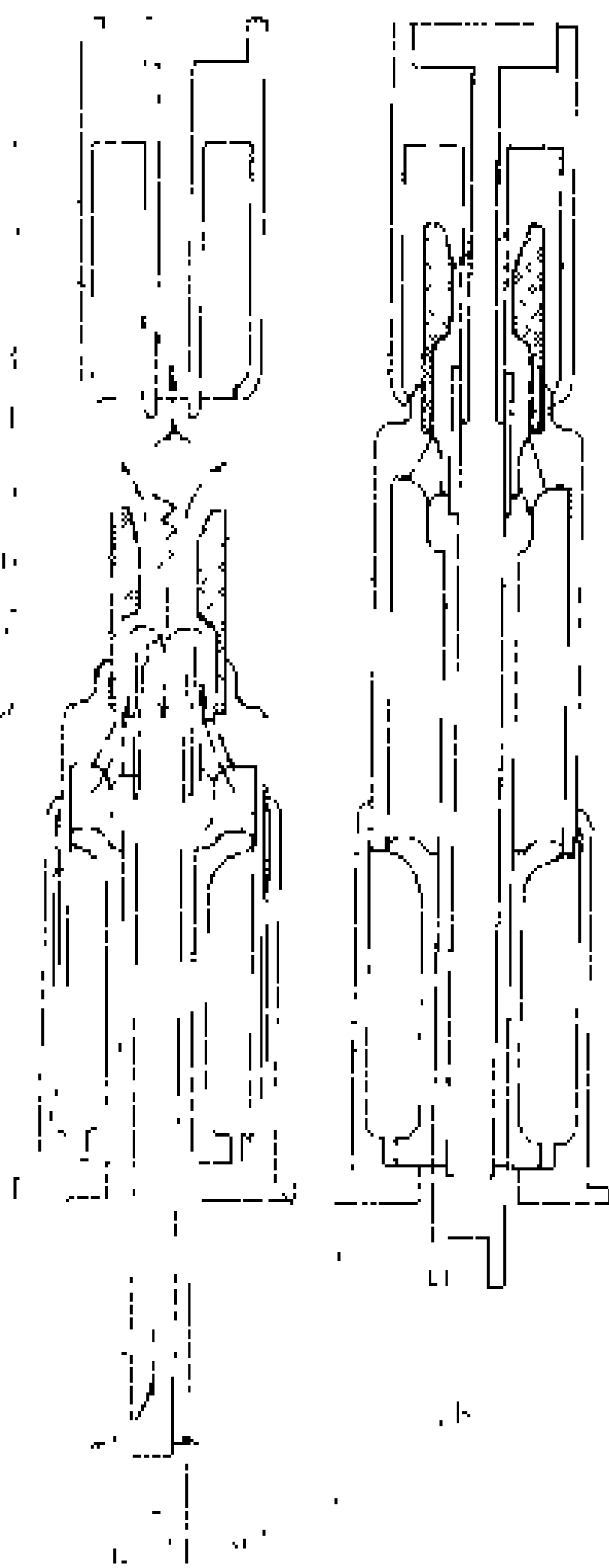
六氟化硫断路器 (SF<sub>6</sub> gas circuit breaker)

以六氟化硫 (SF<sub>6</sub>) 气体为灭弧介质或同时兼作绝缘

介质的断路器。其单断口电压甚高于其他型类的断路器。在超高压断路器中，SF<sub>6</sub> 断路器的元件数最少，可靠性高，开断能力强，检修周期长，无火灾危险，因而很受欢迎，发展迅速。参见彩图插页第 20 页 62 图。

六氟化硫气体 它是近代最好的灭弧和绝缘介质，由法国人穆瓦桑 (Moissan) 和勒博 (Lebeau) 合成于 1900 年，1904 年开始被用作灭弧介质。它的优良特性是由于其具有“负电性”，在放电过程中，负电子与离子结合形成许多负电性离子，另有一部分 SF<sub>6</sub> 分子也吸收自由电子形成负电性离子，使电弧电导迅速下降从而灭弧。SF<sub>6</sub> 气体也被称为负电性气体，其绝缘能力与变压器油相当，而灭弧能力约为相同压力空气的 100 倍。但在低温环境下 SF<sub>6</sub> 气体可能液化而影响断路器的开断和绝缘特性，限制了它在低温地区（如苏联、加拿大）的使用。目前正研究在 SF<sub>6</sub> 气体中加入一定比例的 N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、He、CO、C-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 或氟气，以提高其低温特性，并已取得了一定的进展。

SF<sub>6</sub> 气体是一种无毒无味、化学性质稳定的气体，



单压式（压气式）灭弧室结构

原理图

(a) 分闸位置；(b) 合闸位置

1—主定触头；2—弧触头；3—电弧；4—SF<sub>6</sub> 气流；5—喷嘴；6—动弧触头；7—主动触头；8—喷嘴筒；9—活塞

但与水分和其他杂质成分混合后，在电弧高温作用下，将会分解并形成低氟和金属氟化物，其中的某些成分含有剧毒和强烈的腐蚀性。

SF<sub>6</sub> 断路器的密封性至关重要，通常规定年泄漏量不超过 1%。这一数值既能保证不导致频繁的补气，又能保证在使用的 15~20 年内，在指定的日温差变化环境中，由大气进入设备内的水气含量的凝露点不高于摄氏零度，亦即在出现饱和时，凝露将以结冰的方式出现，以免降低断路器内部的绝缘水平。

灭弧室结构 最初的 SF<sub>6</sub> 断路器是将触头置于充满 SF<sub>6</sub> 气体的箱壳中，其开断

能力可达 2 kV，200 A。之后，按照多油断路器的方法，将箱壳中的开断电弧分为两段，一段电弧激发气

压, 驱使气流冲向另一段电弧, 这样可使开断能力增大。后又进一步发展为双压式 SF<sub>6</sub> 断路器, 将灭弧内腔分为高压区和低压区两个部分, 在开断时, 起动阀门使 SF<sub>6</sub> 气体由高压区流向低压区以熄灭电弧。它又可按气吹方式分为上游气吹和下游气吹两类。但是, 双压式结构复杂, 有一部分 SF<sub>6</sub> 气体要求加压, 如果加压气路的绝缘破坏, 将导致高压接地, 引起严重事故。在六氟化硫断路器的发展过程中, 还采用了活塞和气缸体系, 如图所示为单压式(压气式)灭弧室结构原理图, 在开断过程中, 由操动机构操作活塞, 将压气室中的 SF<sub>6</sub> 气体加压至所要求的压力, 然后按预定的通道(喷嘴)吹向电弧, 一般均使用纵吹方式。单压式结构简单, 发展迅速, 不过它需要强大的操作功, 采用气动和液压操动机构可满足这一要求。单压式的断口结构又分为变开距和定开距两类。按照积木式结构, 单压式可形成整个超高压断路器系列。目前已能制出 63~100 kA、735 kV、单断口电压达  $420/\sqrt{3}$  kV 的 SF<sub>6</sub> 断路器。

**产品型式** 六氟化硫断路器按其结构型式不同, 可分为敞开式和落地罐式两种。①敞开式六氟化硫断路器也称支柱瓷瓶式, 是以 SF<sub>6</sub> 气体作绝缘介质, 采用类似少油断路器的结构方式形成的。这种型式结构简单, 较为经济, 应用很广, 但它没有附加电流互感器。中国平顶山开关厂的 FA 系列产品即属此类。②落地罐式六氟化硫断路器也称接地箱壳式, 是把断路器装在接地的金属外壳中, 进出高压回路通过高压套管来实现, 其价格较高, 但它能附加电流互感器, 耐受地震的能力也优于敞开式。

将 SF<sub>6</sub> 断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、母线段等共同装在一个以 SF<sub>6</sub> 气体绝缘的接地金属壳体中, 形成封闭式的组合电器, 称为气体绝缘金属封闭电器 (GIS)。

(曹荣江)

liufuhualiu jueyuan bianyaoqi

**六氟化硫绝缘变压器** (SF<sub>6</sub>-insulated transformer) 一种在箱壳内充入六氟化硫 (SF<sub>6</sub>) 气体的密封型干式变压器。箱内气体不与大气交换, 而气体压力则随负荷和环境温度的变化相应改变。SF<sub>6</sub> 气体无毒、无嗅、不燃, 其物理和化学性能稳定。六氟化硫绝缘变压器与油浸式变压器相比, 其优点是可以避免因事故而引起火灾和爆炸的危险; 与其它干式变压器相比, 其优点是它能耐受恶劣的环境条件。1956 年美国通用电气公司生产了第一台 69 kV、2000 kV·A 的六氟化硫绝缘变压器, 其后在日本等国有了较大的发展, 已具有 275 kV、2000 MV·A 以下的六氟化硫绝缘变压器的成批生产的能力, 500 kV 的六氟化硫绝

缘变压器也可望得到生产。

六氟化硫绝缘变压器的结构和制造工艺比较复杂, 在绝缘性能方面, 还需要提高局部放电的起始电压和熄灭电压。由于 SF<sub>6</sub> 气体的导热性能远比绝缘油差, 需要设法改善箱体内部的散热状况。对容量不大的用于配电的六氟化硫绝缘变压器, 一般采用自冷却方式; 对于大容量的六氟化硫绝缘变压器, 则采用蒸发冷却的方法, 通常是用常温下为液态的全氟正丁醚 (C<sub>4</sub>F<sub>10</sub>O) 在变压器运行温度下气化吸热, 达到冷却绕组的目的。SF<sub>6</sub> 气体的绝缘和冷却特性取决于箱内气体的密度, 为保证这些性能, 运行中要有相应的监视装置, 如压力表、温度计及带有温度补偿的压力(密度)继电器等, 以综合分析其压力效果。六氟化硫绝缘变压器的箱内 SF<sub>6</sub> 气体, 工作压力通常不超过 0.2 MPa。

(凌 彪)

ludeng dengju

**路灯灯具** (lantern for roadway lighting)

用于道路照明不包括光源在内的辅助照明设备。灯具与光源组合为照明器。灯具的功能是固定和保护光源, 并把光源发出的光通合理地分配到需要的方向, 提高光通的利用率和避免光源引起的眩光。

**灯具结构** 根据其类型和用途有所不同, 主要由灯座、灯罩、反光器和透光罩四个部件构成。①灯座, 主要由铜片和瓷件组成, 其作用是固定光源, 也是光源和电源的连接件。②灯罩, 由金属(主要是铝)或塑料制成, 其作用是防止眩光, 保护视觉, 固定灯座和反光器等, 并使灯具美观大方。③反光器, 由铝板压制而成, 其作用是把光源发出的光通合理地反射到需要的方向, 提高光通的利用率。④透光罩, 由玻璃、塑料或有机玻璃制成, 其作用是与灯罩组成一体, 隔绝外界灰尘和有害气体对光源和反射器的污染、侵蚀, 提高灯具的效率。

**灯具分类** 通常有按用途分类、按配光分类和按防尘防水性能分类三种方法。


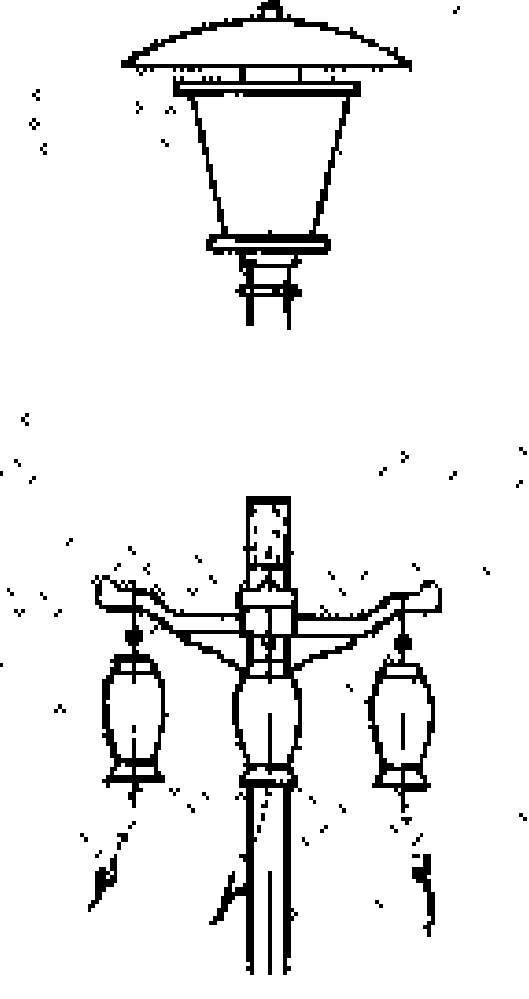
**按用途分类** 可分为功能性灯具和装饰性灯具两大类, 如表 1 所示。

**按配光分类** 可分为截光型、半截光型和非截光型三种。这是国际照明委员会 (CIE) 在 1965 年推荐的方法, 为多数国家(包括中国)所采用, 见表 2。

国际照明委员会在 1977 年推荐按灯具的射程、扩散和控制等三种属性进行分类的方法。这种方法比较科学合理, 但目前国际上采用的不多。

**按防尘防水性能分类** 国际电工委员会 (IEC) 将灯具的防尘性能分为 6 级, 防水性能分为 8 级。级别越大, 性能越好。例如一级防尘为防护直径大于 50 mm

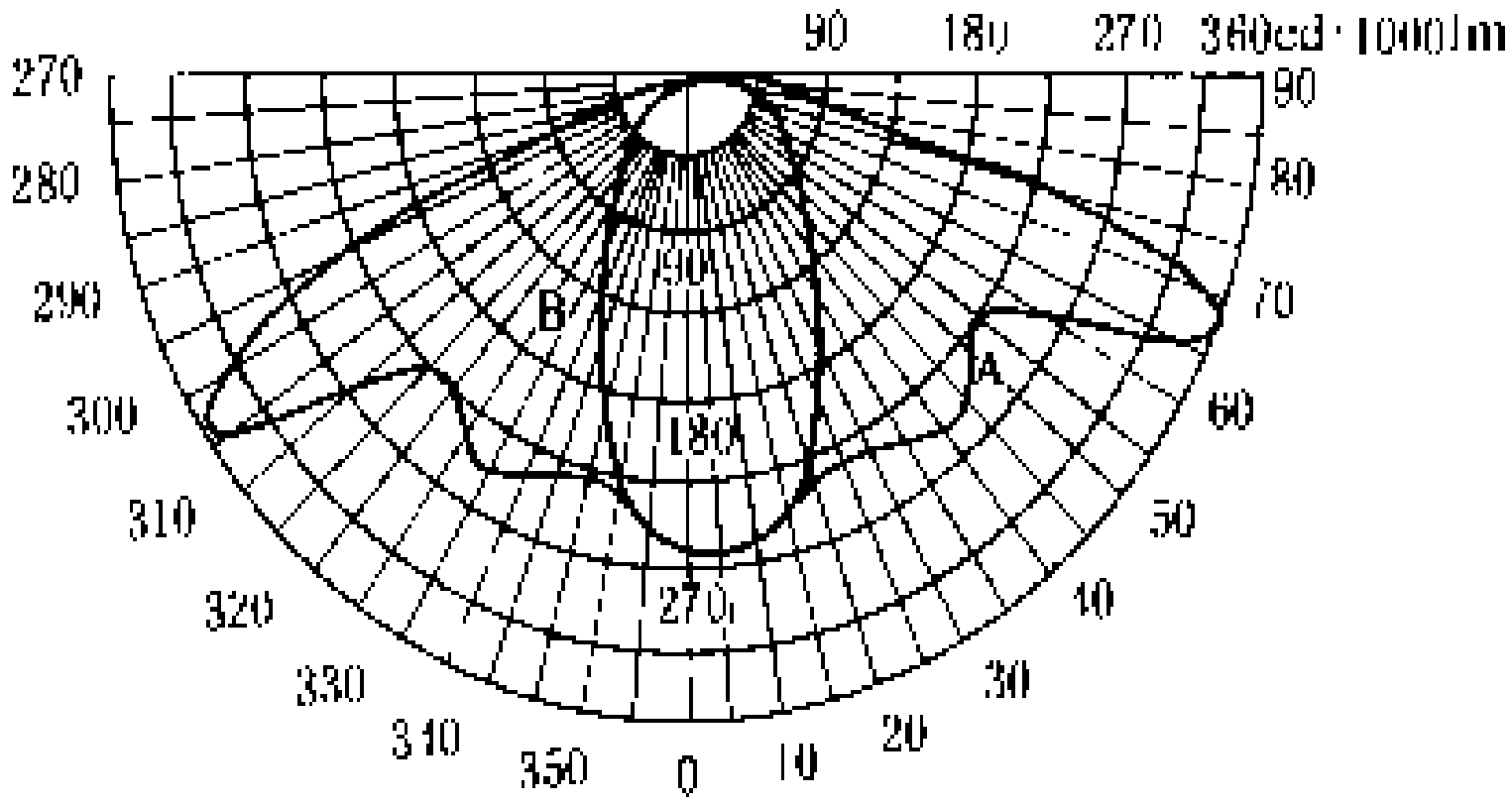
表 1 路灯灯具按用途分类表

类别	图 例	说 明	适用场所
功能性灯具		灯具内有反光装置，以重新分配光源的光通，使其配光符合道路照明的要求，提高光通的利用率，眩光也受到限制。此类灯具也有一定的装饰效果。	常用于一般道路、大型广场、停车场及立体交叉等场所的照明。这些场所对照明的要求较高
装饰性灯具		一般采用装饰性透光部件围绕光源组合而成，透光部件的面积在整个灯具中所占的比例较大。此类灯具以造型美观、美化环境为主，适当兼顾效率和限制眩光等要求	一般多用于庭园、商业街道的照明。人行道及艺术效果要求高的广场也可以采用

的固体物，六级防尘也称完全防尘或“尘密”。又如一级防水为防垂直落下的雨滴，八级防水为可受长时间浸泡，也称“加压水密”。

灯具光度参数 灯具在出厂时一般要提供配光曲

线、灯具效率、等光强曲线和利用系数曲线等光度参数。①配光曲线：通常是在通过照明器发光中心的平面上，用极坐标把各个方向的光强值表示为角度函数的曲线（以照明器对地面的垂线方向为零度），用以表示照明器的光强空间分布特性，如图所示。对于聚光类型的照明器，由于发出的光通集中在狭小的角度内，其配光曲线用直角坐标表示。也有的用表格形式列出，称为光强分布表。②灯具效率：以百分数表示的照明器辐射出来的光通量与光源发出光通量之比值，用以衡量灯具光学系统效率的高低。③等光强曲线：设照明器位于一个假想球的球心上，把光强度相等的那些方向所对应的点连接而成的曲线即为光强度相等的曲线，这些光强度相等的曲线簇称为等光强曲线。④利用系数曲线：利用系数指路面接受到的有效光通量与照明器发出的光通量之比，而利用系数曲线则表示灯具装在不同高度时，在人行道和车行道上各点的利用系数。



配光曲线  
曲线 A—平行于道路走向的配光；  
曲线 B—横穿道路的配光

表 2 路灯灯具按配光分类表

类 型	最大光强方 向	指定角最大允许光强值		说 明
		90°	80°	
截光型	0°~65°	10 cd/1000lm*	30 cd/1000lm	该类灯具将沿道路轴向的光作了严格限制，即使在周围环境中较高的情况下也感觉不到眩光，一般用于高速公路、主要干道等重要场所
半截光型	0°~75°	50 cd/1000lm*	100 cd/1000lm	该类灯具一方面将沿道路轴向的光通作适当限制，另一方面将光通尽量向外延伸。已被广泛应用于一般道路
非截光型	—	1000cd	—	该类灯具对沿道路轴向的光通不作限制，其光源基本上是裸露的，眩光大。适用于交通流量少和居民区的道路

\* 不管光源发出多少光通，光强最大值不得超过1000cd。

(陈圣高)

ludeng gondian fangshi  
路灯供电方式 (power supply of roadway lighting) 路灯是城市用电的一种特殊负荷，它关系到城市居民的生活、城市的交通安全和城市市容

的美观。因此，路灯供电电源应具有一定的可靠性、独立性、实用性和灵活性。路灯供电分为独立系统供电方式和非独立系统供电方式两大类。非独立系统供电方式又可分为独立低压路灯系统和公用低压路灯系统两

种。此外，从路灯供电网络与公用低压配电网之间的关系来区分，又可分为耦合的接线系统和非耦合的接线系统两类。

**独立系统供电方式** 采用独立系统供电，要有专用于路灯的变压器和单独的高压配电网。其优点是电压质量较好，缺点是高压专用供电线一旦发生故障，灭灯范围较大，且投资多，工程量大。这种供电方式仅在个别大城市中采用。

**独立低压路灯系统** 在此供电系统中，路灯由接在公用高压配电网上的专用的变压器供电。这种供电方式，仅用于路灯负荷很大的城市中。

**公用低压路灯系统** 在此供电系统中，路灯由供电给一般配电网的公用变压器来供电。这种供电方式最为普遍。

**耦合的接线系统** 路灯采用公用低压配电网零线的接线系统（见图 1）。如果路灯供电网络与公用配电网的线路架设在同一杆塔上，即可采用这种接线系统。采用耦合的接线系统能节省投资，一般城市都可采用。

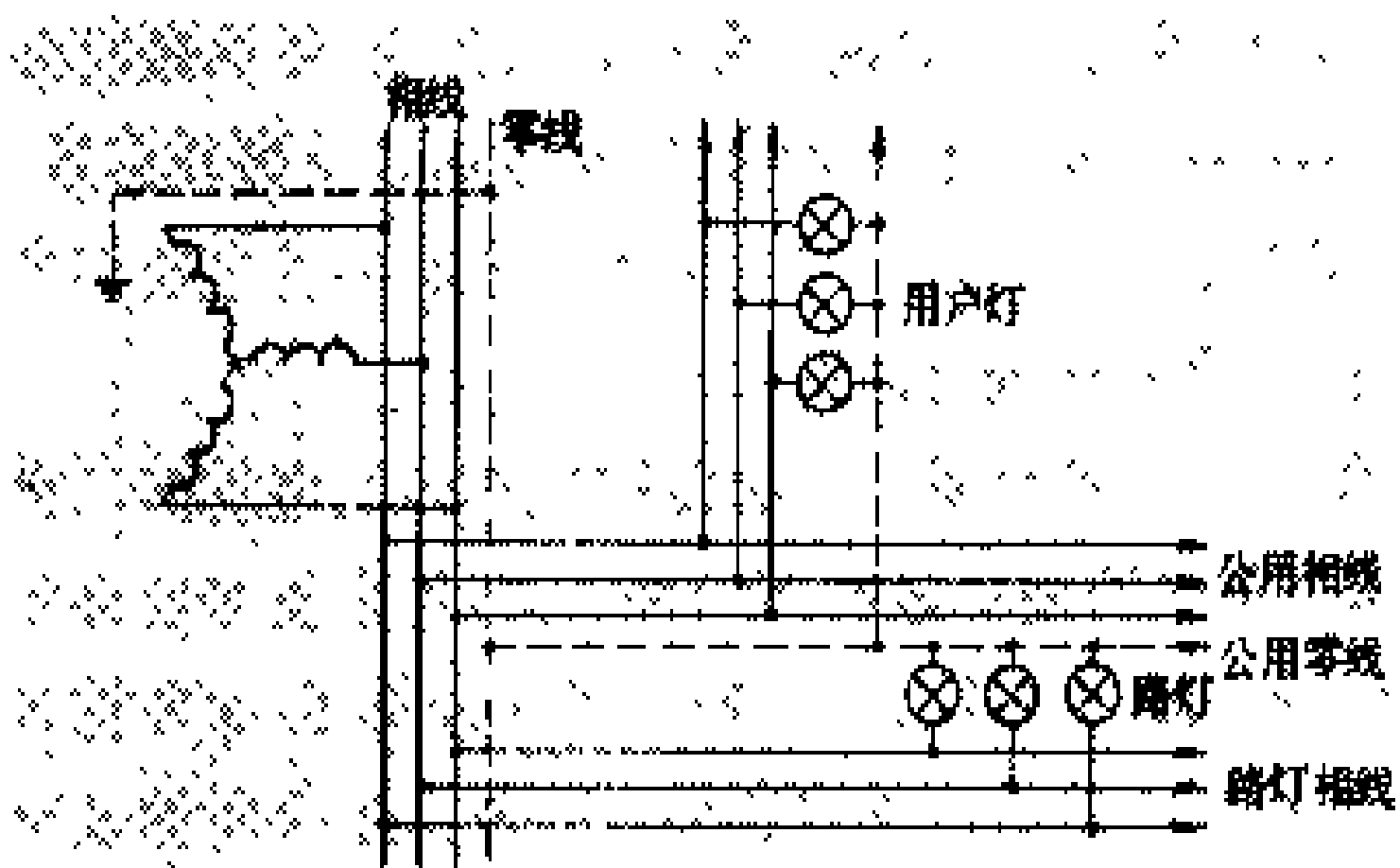


图 1 耦合的三线制接线系统

**非耦合的接线系统** 路灯接线不利用低压配电网的零线而另外单独敷设零线的接线系统（见图 2）。双线制（相线-零线）系统仅应用于同时接通和切断所有该线路或线路某段上的路灯。当必须切断部分路灯时（半夜照明），可采用三线制（两根相线-零线）或四线制（三根相线-零线）线路。如果用四线制，可以使负荷均匀地分布于各相线上。非耦合的路灯接线系统主要应用于大城市和中等城市的中心街区照明，可采用

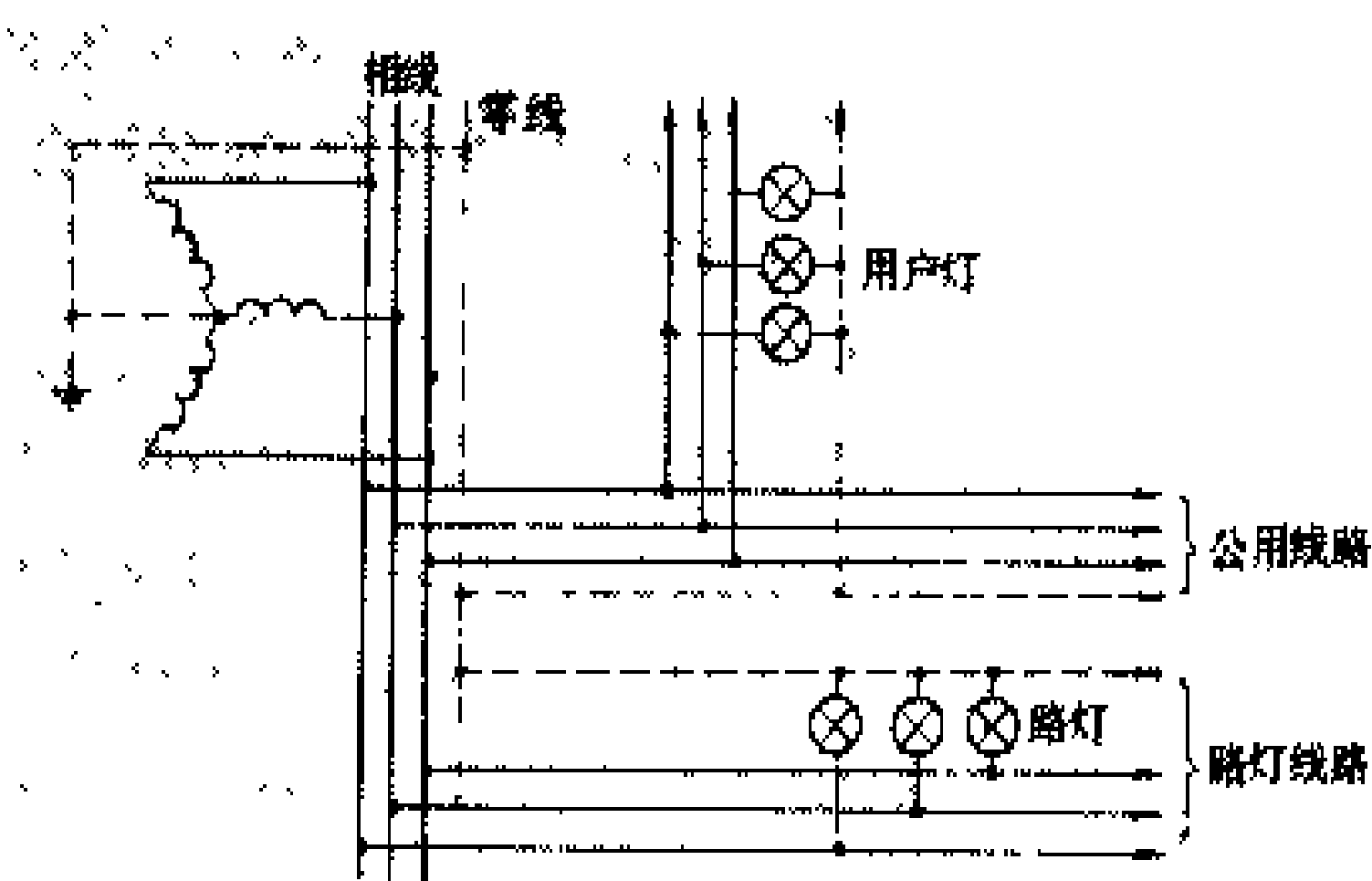


图 2 非耦合的四线制接线系统

架空线路或电缆线路供电。

为了消除在路灯负荷的接入瞬间产生的电压波动对公用配电网的影响，一般情况下，如路灯负荷不超过公用配电网干线最大负荷的 10% 时，允许利用公用配电网的一条相线-零线的线路；当路灯负荷不超过公用配电网干线负荷的 20% 时，可利用公用配电网的两条相线-零线的线路；如路灯负荷超过公用配电网干线负荷的 20% 时，在所有情况下都应利用三条相线-零线的接线系统。

路灯照明使用的光源包括白炽灯、荧光灯、高压汞灯、高压钠灯、金属卤化物灯、低压钠灯等。它们的光度及寿命与承受的电压有密切关系，电压超过额定值时，光度增加而寿命缩短，电压低于额定值时，光度减少而寿命延长。寿命的缩短率及光度的减少率，远大于电压的变动率。因此，路灯线路不宜过长，务使电压变动限制在  $\pm 5\% \sim -10\%$  之内。

见路灯控制。

### 参考书目

[苏]丘卡耶夫著，城市供电，冠湘译，北京：人民教育出版社，1958

（孙宗伟）

ludeng kongzhi

### 路灯控制 (roadway lighting control)

接通和切断路灯电源的方式和方法。它由控制器件与控制方式组成控制系统。各种控制器件的工作性能在实质上都要能根据自然光的明暗变化来控制路灯的开闭。控制方式要适合近期和长远发展的运行需要，关系到路灯照明的质量、交通安全和能源的消耗。在安全可靠的前提下，选择节电、运行维修简便、投资少的控制系统。同时还要尽可能做到路灯在同一时间开闭。路灯的控制运行方式分为串联式和并联式两种。控制方法分为人工控制、定时控制、光电控制、遥远控制和微型计算机控制五种。

**串联式控制** 由路灯总控制室送出的路灯照明线控制第一个路灯配电箱 1，路灯配电箱 1 的路灯照明线带电后，再控制后一个配电箱 2，以此类推直至最后一级配电箱，然后经反馈信号线路送至总控制室，起到监察线路运行的作用（见图 1）。它的优点是投资省。但一旦首端或中途某一路灯配电箱或线路发生故障，将会影响到此后的大批路灯供电。

**并联式控制** 由路灯控制室专放控制线，其后的数十个路灯配电箱控制线都接在路灯专用控制线上（见图 2）。如某一路灯配电箱发生故障，影响范围只限在本配电区内。它的缺点是一次性投资大。

路灯控制方式除串联式和并联式外，还可以将串

级式与并联式结合起来控制使用。

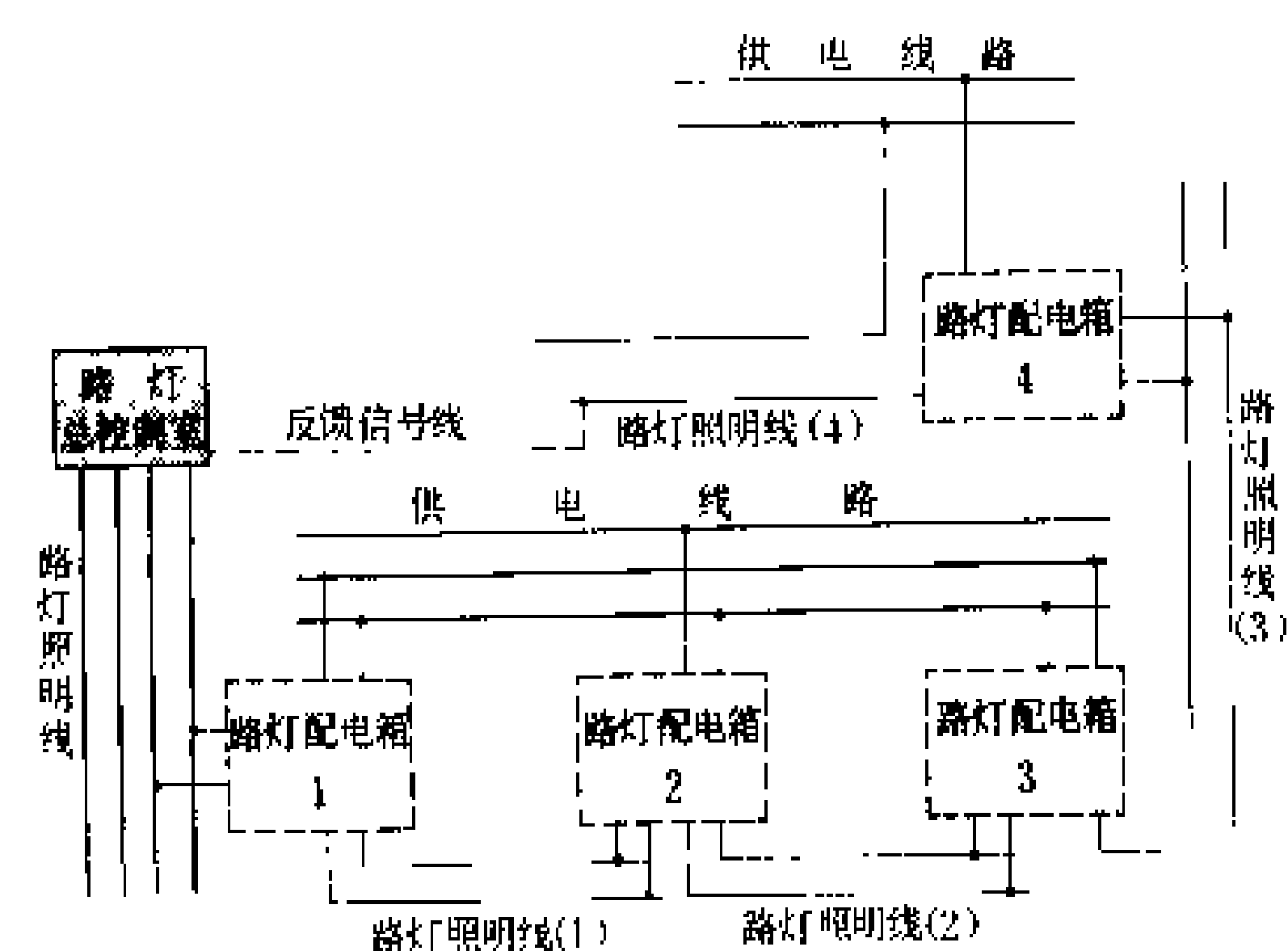


图1 总控制室与路灯配电箱串联式连接图

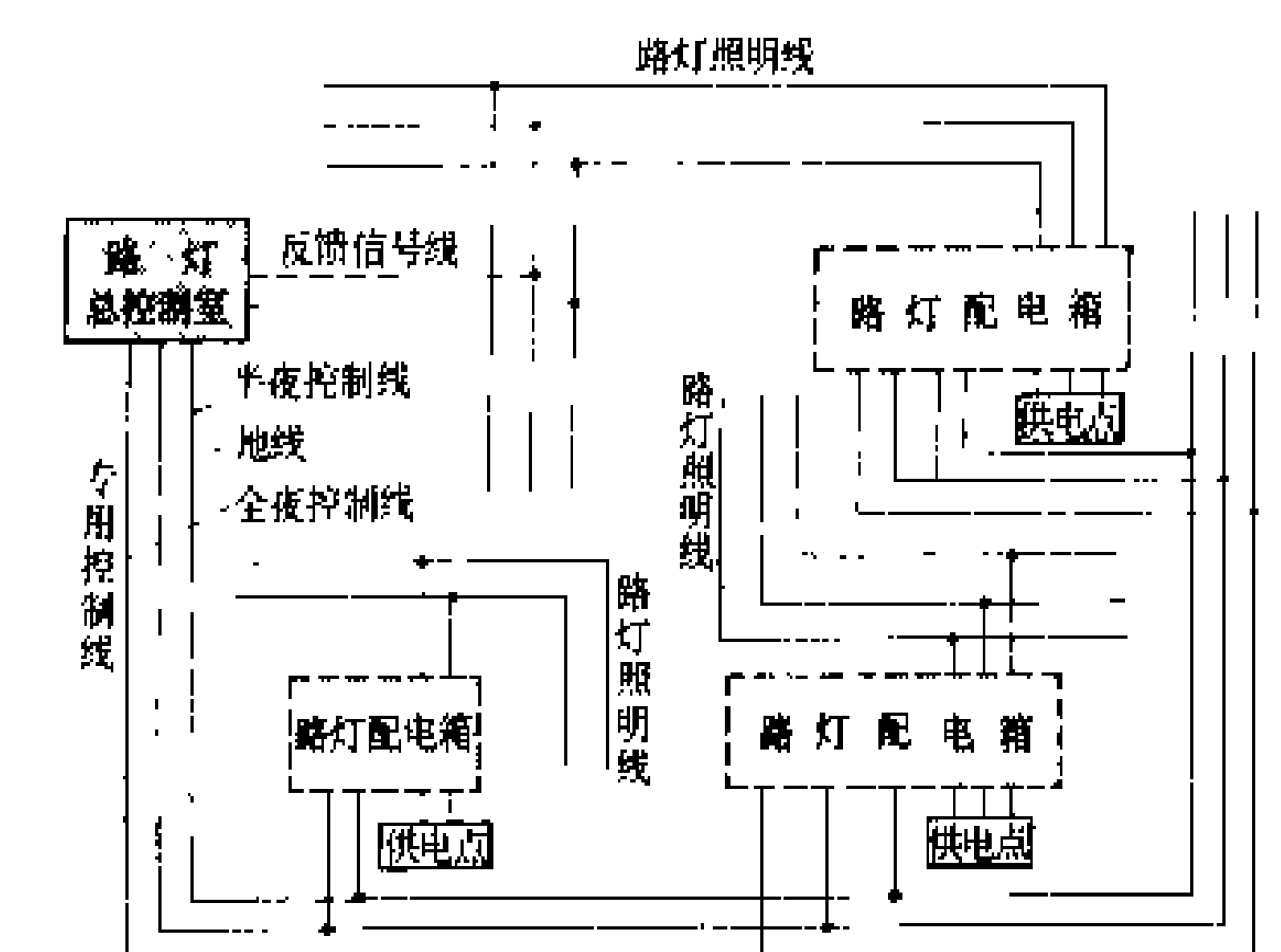


图2 总控制室与路灯配电箱并联式连接图

**人工控制** 可在控制室内按路灯开闭时间通过人工操作使接触器动作,从而使路灯电源接通或断开。这是最简单的控制方法,需专人值班。其控制标准有三种:①按路灯管理部门规定的开闭时刻表来执行;②按道路照明开闭照度标准执行;③按值班人员眼睛直观感觉为标准执行。其中以第②种方法为好。

**定时控制** 根据城市所在地理位置的日出日落时间确定路灯开闭时间,利用电磁、机械、电子的原理使接触器触头闭合或断开,以控制路灯的开闭。按其工作电流不同分为交流控制和直流控制两种;按工作原理不同分为电动钟控式、钟摆式、电子钟以及晶体延时电路等多种类型。定时控制需随着季节变化调整路灯开闭时间。

**光电控制** 是一种新型的路灯电源自动控制装置,其工作原理见图3。当光导管未受光照时内阻很大(可以大于 $10M\Omega$ );受到光照时,内阻随光照强度增加而减少(可以小到数千欧)。在光未照到光导管上时,光导管处于截止状态,相当于晶体管的基极b没有接偏流电阻,没有偏流,可近似地认为集电极c无电流通过,与电源正端同电位。有光照射时,光导管的内阻就减小,相当于晶体管的基极加了一个偏流电阻至电源,

就建立了偏流,晶体管处于导通状态,集电极就基本上与地同电位。如将电阻 $R_2$ 换为继电器,就能使晶体管带动继电器而动作。在实际使用的电路中,尚须增加其它功能,例如延时功能,使光控装置更适合实用需要。光电控制是控制路灯开闭的最好方式,它能按预定的照度开闭路灯,使用简单,并且能起到节能作用。光电控制器的光电头宜测天顶光,应避免四周杂散光的干扰,一般应有2s以上的延时装置,可不受雷电的干扰而误动作。光电头要经常保持清洁,并定期用照度计进行校正。

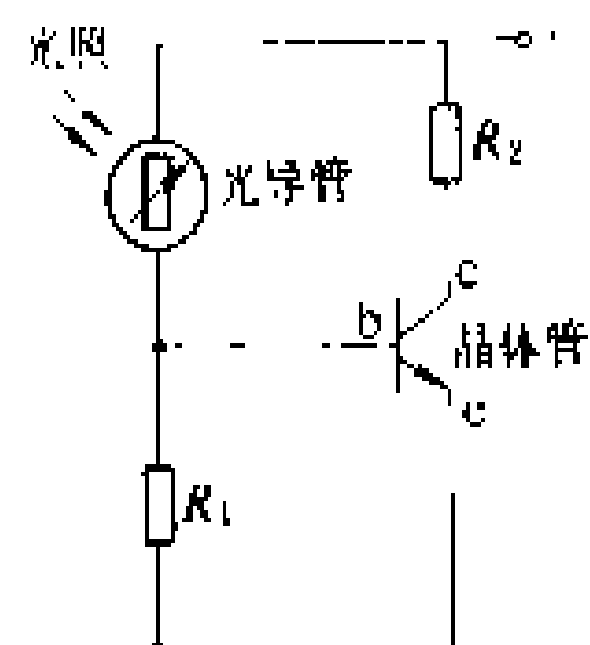


图3 光电控制  
工作原理图

**远程控制** 在总控制室集中遥控全市各路灯配电箱的运行。总控制室内安装一台频率发射器,由步进选择器按顺序连续发出十多个不同的频率信号,每一个路灯配电箱规定用一个频率。当总控制室发送某一频率时,只有相应的一个路灯配电箱被控制,使该路灯配电箱所接路灯投入正常运行。当所有路灯全都开启后,步进选择器定时巡回检测,将各路灯配电箱电流信号反馈到总控制室进行监察。

**微型计算机控制** 具有定时控制和光电控制二种功能,是集中控制中最好的一种方法,可根据需要选定其中一种功能为主控,另一种功能作为修正。定时控制可预置全年的路灯开闭时刻表,并具备夏令时制及闰年的自动调整和点燃时间累计的功能。

见路灯供电方式。

(孙宗伟)

ludeng zhaoming

**路灯照明** (roadway lighting) 为车辆和行人的交通安全提供必要的视看亮度的道路照明设施。有时也泛指有关路灯设施的设备、照明情况、供电线路和控制管理等内容。

**功能和目标** 路灯照明要保障交通安全,提高运输效率,方便人民生活 and 有利于治安管理。路灯设施要安全可靠,经济合理,节省能源,维修方便,技术先进,并对美化城市环境产生良好效果。

**主要技术指标和标准** 国际照明委员会(International Commission on Illumination, CIE)是照明工作者的国际性组织,有不少国家已全部或部分接受CIE的道路照明标准作为本国的标准。中国原城市建设环境保护部已印发《城市道路照明指南》,还将颁发有关的标准。由于道路交通繁忙的情况和复杂的程度不同,照明区域(如商业区或住宅区等)性质不同,CIE和各



国的标准均在道路及区域分类的基础上推荐或制订不同的要求。道路照明标准应满足路面平均亮度（或照度）、亮度（或照度）均匀度、眩光限制三项技术指标，以及照明设施能提供对交通的良好诱导性。

**路面平均亮度（或照度）** 人们观察物体产生明暗的感觉取决于物体在人眼视网膜上成象的亮度。在路灯的照明下，机动车辆驾驶员觉察前面的障碍物主要依靠障碍物和它的背景（如路面）间的亮度差。在路面上觉察障碍物所需的最小亮度差，决定于障碍物的视角和视野内路面的亮度分布。视角大，背景的亮度高，则眼睛的对比灵敏度高。所以提高背景的亮度，也就是提高路面的亮度就可以提高驾驶员辨认障碍物的可靠性。路灯照明一项重要的指标就是路面的平均亮度（ $L_{av}$ ）。路面的亮度由照明提供，但与路面材料的反光特性有关。过去多以平均照度（ $E_{av}$ ）为指标，仍有国家保留使用。根据国外的试验和调查，主要干道的平均亮度应达到  $1.5 \sim 2 \text{cd/m}^2$  的水平。CIE 推荐的平均亮度，不同类型机动车辆通行的道路分别为  $0.5 \sim 2 \text{cd/m}^2$ 。日本、德国、荷兰等国的标准基本上与 CIE 的相同。美国的标准为  $0.3 \sim 1.2 \text{cd/m}^2$ ，同时还有一套以照度衡量的标准，结合路面类型和路面材料的反光特性，分别为  $3 \sim 17 \text{lx}$ 。苏联的标准为  $0.2 \sim 1.6 \text{cd/m}^2$ ，对某些道路和广场则以照度为标准。中国《城市道路照明指南》要求为  $0.3 \sim 1.5 \text{cd/m}^2$ ，或平均照度为  $5 \sim 20 \text{lx}$ （适用于沥青路面，如为水泥路面可降低约 30%）；对非机动车和行人通行的街巷平均照度的要求为  $2 \text{lx}$ 。

**路面亮度（或照度）的均匀度** 路灯装置为路面提供良好的平均亮度（或照度），但可能在路面上的某些区域产生过低的亮度，使障碍物亮度与路面亮度对比值降低，驾驶员难以觉察。因此，为了使路面各点亮度均有足够的识别效果，在路灯照明标准中规定了路面最小亮度（ $L_{min}$ ）和平均亮度（ $L_{av}$ ）之间最小的允许比值，即总均匀度  $U_0 (= L_{min}/L_{av})$ 。有的照明标准还规定车道中心线上的均匀度要求，即纵向均匀度  $U_L$  为最小亮度（ $L_{min}$ ）与最大亮度（ $L_{max}$ ）之间最小的允许比值，即  $U_L = L_{min}/L_{max}$ 。CIE 和各国标准，对机动车道路面亮度（或照度）的均匀度要求为： $U_0 \geq 0.3 \sim$

$0.4$ ， $U_L \geq 0.6 \sim 0.7$ 。中国《城市道路照明指南》中只规定了机动车道的总均匀度  $U_0 \geq 0.3 \sim 0.4$ 。

**路灯的眩光限制** 眩光分使观察者丧失视觉能力的失能眩光（也称生理眩光）和引起观察者视功能疲劳或不舒适感觉的不舒适眩光（也称心理眩光）两类。①由于路灯装置引起视觉灵敏度降低的失能眩光，以阈值增量（TI，%）度量，也可由光幕亮度（ $L_v$ ）与路面平均亮度（ $L_{av}$ ）的比值衡量。CIE 规定  $TI \leq (10\% \sim 20\%)$ ，美国规定  $\frac{L_v}{L_{av}} \leq 0.3 \sim 0.4$ 。②照明装置引起的不舒适眩光感觉程度以 G 值表示，分 1~9 级。G 值可根据灯具的光度参数和装置的特性以经验公式计算，G 值应不小于 5。目前，中国对机动车道限制使用非截光型灯具以避免眩光。

**照明的诱导性** 分视觉诱导和光学诱导两类。通过道路的诱导辅助设施，如路面中线、路面标志等使驾驶员明确自身所在的位置和道路走向的称为视觉诱导。通过灯杆和灯具的排列、灯具的式样、灯光颜色或其强度的变化，标明道路走向的改变或将接近交叉路口等特殊地点，称为光学诱导。路灯照明应发挥光学诱导作用，也应提高道路的诱导辅助设施的可见度，以起到视觉诱导的作用。由于灯具布置不妥当而产生错误的光学诱导必须绝对避免。

**展望** 由于近代城市交通日见繁忙和复杂，对路灯照明的要求日益严格。随着科学技术的发展，路灯照明也有不少新的研究成果，例如以路面亮度建立的照明标准比原先以照度建立的标准更加科学合理。1983 年在荷兰召开的第二十届 CIE 大会上，有人提出论文，认为今后几年有可能以可见度作为制订道路照明标准的依据。随着交通事业的发展，照明标准中对平均亮度的要求越来越高。各国照明标准提出的指标应该以保证夜间交通安全和舒适为最低要求。

参见彩图插页第 28 页 87 图。

#### 参考书目

American National Standard Practice for Roadway Lighting, IES RP-8. New York, 1983

（陈圣斋）



Manikuagen - Mengteli'er shudian xianlu

**马尼夸根—蒙特利尔输电线路** (Manicouagan - Montreal transmission line) 世界上第一个 700 kV 级输电工程,是加拿大魁北克水电局 735 kV 超高压输电的第一期工程,于 1965 年秋季正式投入运行。该线路将建在加拿大东北部马尼夸根河和乌塔尔德河上的七座水电站的电力(总输出功率为 530 kW)送至负荷中心魁北克市和蒙特利尔市。线路全长 560 km。第一段马尼夸根—魁北克市长 368 km;第二段魁北克市—蒙特利尔市长 192 km。自然功率为 200 万 kW。该工程的最终规模为三回 735 kV 线路,在送端、中部和末端各有二座变电所,并在相邻的变电所之间设有联络线。首批投运的是单回线路,送端两个升压变电所,中部和末端各一个变电所。

该线路采用自立式铁塔,标准塔型高 39.6 m,宽 42.7 m,重 25 t,档距 427 m。线路走廊宽 91.4 m,两回平行线路走廊之间的宽度定为 163 m。导线为水平排列,采用四分裂的钢芯铝绞线导线(见分裂导线),子导线截面为 689.6 mm<sup>2</sup>,分裂间距为 45.7 cm,相间距离为 15 m。带电部分对铁塔的间隙为 5.59 m。采用 V 型绝缘子串,夹角为 90°。每个 V 型臂由两串绝缘子串并联组成,每串为 35 片 5.75×10 英寸瓷绝缘子,其抗拉强度为 67 kN。铁塔带有二根架空地线,保护角为 20°。线路下部敷设连续地埋线。全线共有四处大跨越,最宽的是萨瑞奈河大跨越,跨距长 1798 m。大跨越处采用四根直径为 27.9 mm 的子导线,相间距离取 24.4 m。大跨越塔不设架空地线。

线路绝缘水平按操作过电压为 2.1 倍相电压设计,绝缘子串的冲击闪络电压为 2200 kV,操作过电压湿闪电压为 1350 kV,工频湿闪电压为 850 kV。为了限制低负荷时的工频过电压和降低操作过电压,在线路两端均装设了电抗器,其总容量相当于线路充电容量的 2/3。采取这项措施后,工频过电压限制在 1.5 倍相电压的水平。

(胡维新)

Meiguo Dianli Yanjiusuo shudian xianlu lixue shiyanchang

**美国电力研究所输电线路力学实验场** (transmission line mechanical research facility of America EPRI)

位于美国得克萨斯州的哈斯莱 (Haslet) 境内,于 1982 年建成,可进行各种类型输电线路的部件、结构及基础的力学试验。该实验场最高可试验 1200 kV 的输电线路结构,也试验过 765 kV 的输电线路铁塔,是当今世界上技术和设备都较为先进的输电线路力学试验场。该试验场占地 866000 m<sup>2</sup>。主要设施有:①试验线段,长 3.2 km;②主控制楼及试验室;③万能基础及加荷塔;④组装场;⑤铁塔加工车间,面积为 2780 m<sup>2</sup>;⑥基础试验场。

**万能基础** 见线路杆塔试验。该试验场设有两个型式相同、大小不同的万能基础,大的为 23 m×23 m,小的为 15 m×15 m,并都有一对延伸的翼。基础本体为 0.9~1.2 m 厚的钢筋混凝土板块,板块置于深 8.5 m 间隔为 2.4 m 的群桩上,桩埋入石灰岩内 5.5 m 深处,每个桩的承载力为 1100 kN,每个塔脚的力由四根桩承受。基础面上设有间隔为 1.2 m 的预埋螺母(又称内锚),用来固定卷扬机和铁塔塔脚。基础中心处有间隔为 0.6 m 的预埋螺母,这是为试验电杆而埋设的。大万能基础允许铁塔最大根开为 21.3 m,铁塔塔脚最大上拔力为 4400 kN,铁塔最大倾覆力矩为 135500 kN·m,电杆最大弯矩为 40700 kN·m。小万能基础承载力是大万能基础的一半。

**加荷塔** 试验杆塔时加载用的支撑结构。大小万能基础侧各有一座横向加荷塔,另有三个纵向加荷塔为大小万能基础和基础试验场共用,它们均可安装在台车上,沿轨道移至要求的位置后,卸去台车轮子,固定在混凝土基础上。加荷塔宽 9 m,高 55 m(可加高至 73.5 m)。每个加荷塔都有三个不同高度的横梁和 24 个主挂点,以满足不同高度的加载要求,每个横梁可承受 1330 kN 的拉力。横向加荷塔能承受的总拉力为 2350 kN,纵向加荷塔承受的总拉力为横向加荷塔的一半。

**组装及加载装置** 一台 2000 kN 的机动吊车,来回吊运被试杆塔,使被试塔尽可能少占用万能基础。铁塔安装与试验时,操作篮悬吊在 2000 kN 的吊车上,以便靠近铁塔进行操作。由卷扬机、拉力传感器、钢丝绳、滑轮组等组成的加载装置,能迅速方便地与被试塔联系起来。45 台卷扬机设在加荷塔的正下方,提供水平和垂直荷载。卷扬机由直流电动机驱动,并由计算机控制速度,其最大拉力为 110 kN。每一加载点备有四台卷扬机。所有卷扬机均可同步运行,并可施加动态荷载。每一加荷点的荷载,由拉力传感器监

测，由计算机按要求控制拉力大小以满足力矢量的几何图形要求。计算机还能随时修正因加荷点偏斜等因素产生的力矢量误差。

数据测试与控制 依靠 PDP11/23 计算机中的软件，测试和控制试验所需的全部数据。计算机中存储了所需要的加荷数据、材料强度、杆件计算应变值等。塔上所有加荷点能同步加载，计算机每秒监视各加荷点若干次，并与事先拟定的荷载、应变值等相比较，以确定试验是否能安全进行。计算机系统有 128 个数据测试通道（可扩展至 380 个），能储存、打印和显示所有控制点的同步读数。被试铁塔的结构性能用视频磁带记录。对停电、计算机故障、试验提前破坏等突发事件，均有应急保护措施，如切断卷扬机电源，闭锁制动闸，关闭整个试验等。

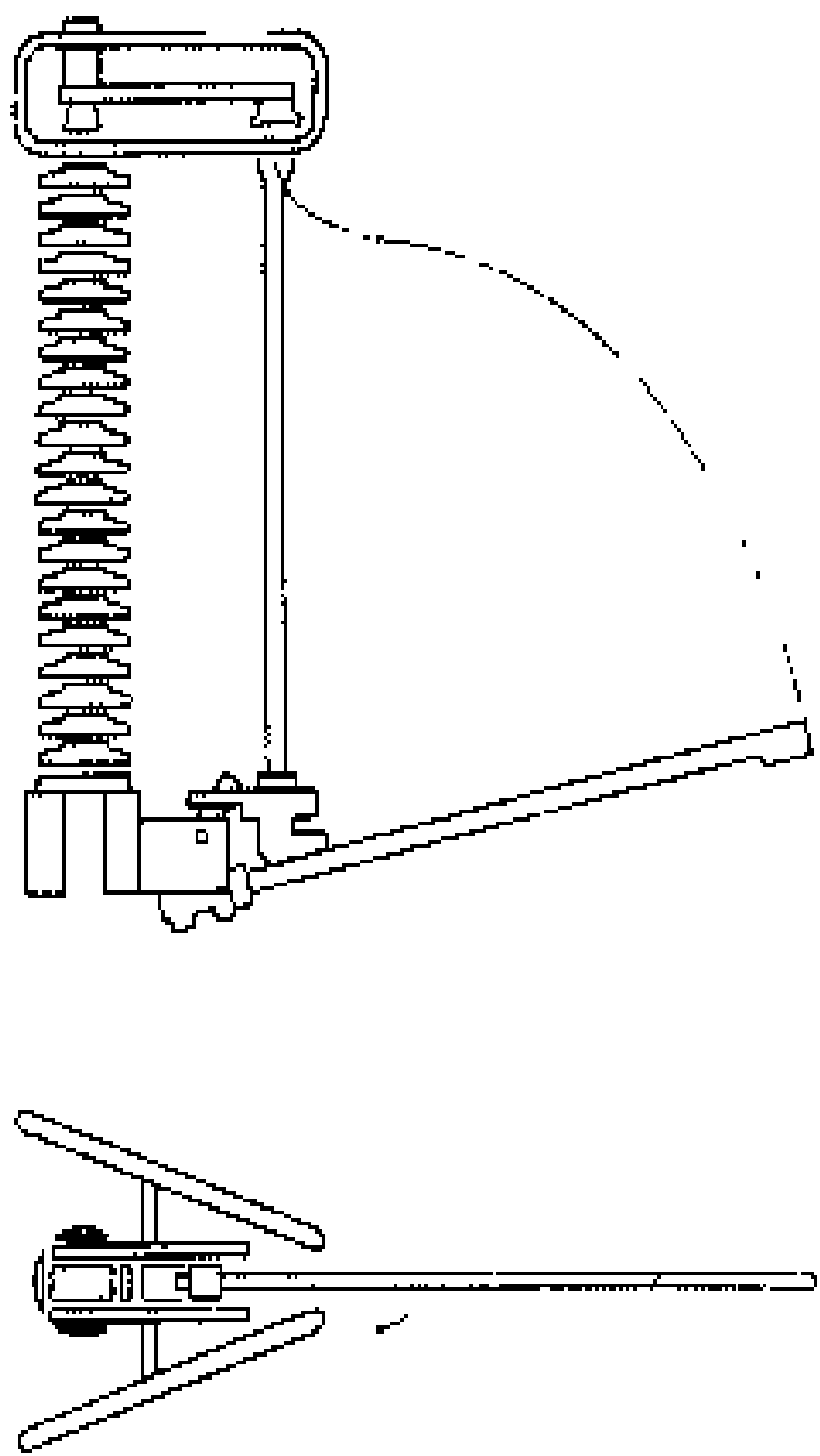
铁塔挠度的测量：采用光电测量系统，并将测得数据直接输入计算机。

(郑仁坪)

muxian jiedi kaiguan

母线接地开关 (earthing switch for busbar)

母线检修时将母线接地用的隔离开关，也称母线接地器。母线检修时为了泄漏正常带电时的残余电荷以及在检修过程中母线可能产生的感应电流，通常要求在被检修的母线两端挂接地线，以保证检修人员的安全。随着电压等级的提高，母线工作电流的增大，母线的外径越来越大，母线结构也从单根变成多根，临时在母线上挂接地线的操作越来越困难，因此发展了专门的母线接地开关。它由一个绝缘支柱和一个金属接地刀闸构成。母线正常工作时，接地刀闸打开，检修母线时将接地刀闸合上。母线接地开关的结构如图所示。母线接地开关的各项技术要求与隔离开关的接地刀闸相同，合闸时应能通过额定短路电流，满足动、热稳定的要求。



母线接地开关

母线接地开关的安装方式有两种：①装在铝管母线构架的横梁上，以代替母线的支柱绝缘子。母线接地开关起到支持铝管母线和实现母线接地的双重作用。

这种安装方式占地最节省，同时母线接地开关可以安装在母线中间或端部任意位置，但要求母线接地开关与母线支柱绝缘子的高度一致。②装在单独的设备支架上，与安装母线支柱绝缘子的横梁分开。这种安装方式不受母线接地开关高度的限制，但只能安装在母线的端部，而且由于单设支架使得占地较大。

20 世纪 70 年代初，中国开始在 220 kV 系统中采用铝管母线，当铝管母线长度大于 20 m 时，要求母线两端挂接地线作为安全接地，因此开发了 220 kV 母线接地开关。110 kV 及以下的铝管母线，结构简单，直径较小，容易实现接地，因此一般不需要专用的接地开关。80 年代，中国开始出现 500 kV 电力系统，在 500 kV 配电装置中除了采用大直径的铝管母线外，还采用多根软导线构成的分裂导线，为此又开发了 500 kV 母线接地开关。目前，中国已能生产 220~500 kV 的母线接地开关系列产品。

(蓝增珏)

muxian xuanze

母线选择 (selection of busbar)

母线将配电装置中各个载流分支回路连接在一起，具有汇集和分配电力的作用。母线选择的主要内容有：母线的类型、母线长期工作时的发热、母线的热稳定、母线的动稳定、母线的经济电流密度和母线的临界工作电压。

母线的类型 母线通常有硬母线、软母线和全封闭母线三种。硬母线用铜或铝做成，形状有矩形、槽型、菱形和管形数种，多用于 35 kV 及以下的屋内配电装置，110~500 kV 屋外配电装置有时也采用铝管母线，电压互感器常采用矩形扁钢连接线。常用的软母线有铝绞线、铜绞线或钢芯铝绞线等，当电压等级较高，电流较大时则采用扩径软导线和分裂软导线作为母线。软母线多用于 35 kV 以上的屋外配电装置和 110~220 kV 屋内配电装置。全封闭母线有共箱式和分箱式两种，共箱式是三相母线同在一个金属箱壳内，分箱式则每相母线单独在一个金属箱壳内。全封闭母线通常用于大容量发电机出口至发电机升压变压器之间的母线以及厂用变压器的分支连接线。（见硬母线选择、软母线选择、全封闭母线选择）

母线长期工作时的发热 铜、铝质裸母线长期工作时的发热允许温度均为 70℃，但当其接触面处具有锡的可靠覆盖层时（如超声波搪锡等），则允许温度能提高到 85℃。当通过交流电流的导体互相靠近时，由于交变磁场的影响，会使导体内电流分布趋向一侧，当一条母线由数片（根）导体组成时，需要考虑这种影响。此外，由于电流频率、导体材料的电阻系数和导体形状



及尺寸等因素,导体的交流电阻比直流电阻要大。当母线的工作电流较大,每相硬母线需由两片或三片导体组成时,由于上述原因和散热条件较差,母线的工作电流并不能成正比地增加。当每相母线由三片导体组成时,中间一片的电流为总电流的 20%,两边的两片各占 40%。当大电流母线靠近钢铁构件时,需要考虑构件发热的问题。这是因为大电流母线附近存在着强大的交变磁场,在其周围的钢铁构件中产生涡流和磁滞损耗,有时还可能感应出很大的环流,这些因素都将导致钢铁构件发热。为此,需适当加大母线与钢铁构件之间的距离,或采用短路屏蔽环,也可在钢铁构件中开槽、加绝缘垫使闭合回路断开。

**母线的热稳定** 短路时导体内产生的很大热量来不及向周围空气中散发,使导体的温度迅速升高,由于短路的持续时间短,所以其允许温度应比长期工作时发热的允许温度高得多。铜、铝质裸母线短路时发热允许温度分别为 300℃和 200℃。

**母线的动稳定** 当发生短路时,母线中将流过很大的冲击电流,并产生巨大的电动力。母线和支柱绝缘子的机械强度不够时,将会发生变形或损坏事故。对布置在同一平面内的三相母线,发生三相对称短路时,中间相所承受的电动力最大,短路电动力的最大值出现在短路后 0.01 s。此外,同一地点两相短路时最大的电动力比三相短路时要小,因此通常按三相短路条件来校验母线的动稳定。增加母线动稳定的措施有:①缩小同一相母线支持绝缘子之间的距离;②增加母线相间距离;③限制短路电流。

**母线的经济电流密度** 它由年运行费用确定,而运行费用主要由电能损耗、设备维修和折旧费组成。其中电能损耗费用与导体材质及年最大负荷运行小时数有关。当导体为某一截面时年运行费最低,此时导体单位截面积流过的电流即为经济电流密度。在变电所和发电厂中,较长的导体和通过大电流的导体特别是发电机出口至升压变压器之间的母线以及变电所内降压变压器至 6~10 kV 配电装置之间的连接线,通常要按经济电流密度选择截面。

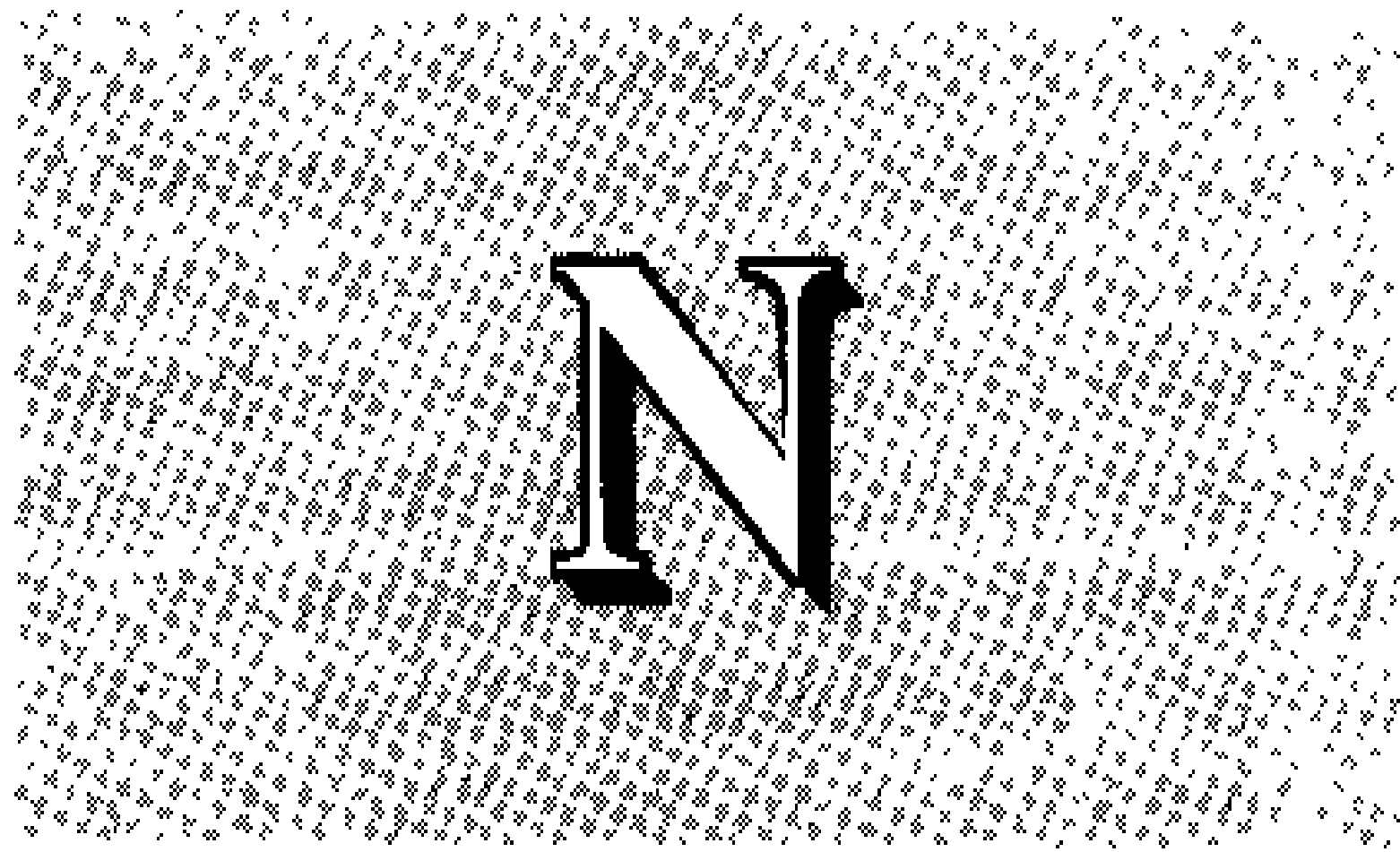
中国现行的经济电流密度值如表。

经济电流密度值 (A/mm<sup>2</sup>)

导体材质	最大负荷时连续工作电流 I <sub>max</sub> (A)		
	<3000	3000~5000	>5000
铜导体和母线	3.0	2.25	1.75
铝导体和母线	1.65	1.15	0.90

**母线的临界工作电压** 母线的工作电压较高时,会使其周围的空气发生游离,在夜晚能观察到其表面出现亮光的现象称为可见电晕。母线产生可见电晕的电压称为临界工作电压。要求母线上的最高工作电压低于它的临界工作电压,以免出现可见电晕。母线的临界工作电压与它的结构(主要指分裂根数、单根导线直径、分裂间距)、安装方式(三相导体水平还是三角形排列、相间距离)、导体表面粗糙程度、污秽程度、海拔高度以及自然状态(晴天还是雨天)等因素有关。

(蓝增珏)



naihuo dianlan  
**耐火电缆** (fire resisting cable) 见电缆防火。

nailai shuiping  
**耐雷水平** (lightning withstanding level)  
电气装置在采取相应的防雷措施后所能耐受的最大雷电流幅值。它是电气装置防雷可靠程度的重要指标。  
线路的耐雷水平指不致使线路绝缘闪络的最大雷电流的幅值。对有避雷线中性点直接接地的线路,雷击杆塔时线路的耐雷水平  $I_1$  为

$$I_1 = \frac{U_{50\%}}{(1-k) \left[ \beta \left( R_t + \frac{L_T}{2.6} \right) + \frac{h_c}{2.6} \right]}, \text{ kA}$$

式中  $U_{50\%}$  为线路绝缘的正极性 50% 冲击放电电压, kV;  $k$  为耦合系数;  $\beta$  为分流系数;  $R_t$  为线路杆塔的冲击接地电阻,  $\Omega$ ;  $L_T$  为线路杆塔的电感,  $\mu\text{H}$ ;  $h_c$  为导线悬挂的平均高度, m。雷绕击于导线时线路的耐雷水平  $I_2$  为

$$I_2 = \frac{4U_{50\%}}{Z}, \text{ kA}$$

式中  $Z$  为线路的波阻抗,  $\Omega$ 。线路的耐雷水平愈高, 则其雷击跳闸率愈低。  
见线路防雷。

(陈慈荃)

neibu guodianya  
**内部过电压** (internal overvoltage) 在电力系统的内部由于故障或开关操作引起回路中电磁能量的转化或传递, 从而造成瞬间或持续性的高于额定工作电压并对电气装置绝缘有危险的电压升高。内部过电压的能量来源于电力系统本身, 故其幅值大体与额定工作电压成正比。内部过电压的大小通常用其幅值与系统最高运行相电压的幅值之比来表示, 称为内部过电压倍数, 它与电力系统的结构、元件的参数、中性点的运行方式、故障的位置与性质以及具体的操作

过程等因素有关, 具有一定的统计规律。  
内部过电压分为操作过电压和暂时过电压两大类。在故障或操作瞬间所发生的过渡过程过电压, 称为操作过电压, 其持续时间以毫秒计。在过渡过程结束后出现的工频过电压和谐振过电压, 统称为暂时过电压, 它在系统发生新的操作之前可能始终保持, 持续时间可达数秒钟以至数分钟以上。

通过长时期的理论探讨, 内部过电压模拟装置 (又称暂态网络分析仪) 的试验研究, 以及电子计算机的数值计算和现场实测, 人们已经掌握了各种内部过电压的产生机理和基本特点, 积累了丰富的统计数据, 并且采取了许多有效的限制措施, 制订了对电气设备的相应试验要求, 提高了系统的运行可靠性。目前, 正在探索各种新的限压方法, 同时, 对于迅速发展的超高压和特高压电力系统, 由于内部过电压在确定绝缘水平方面所起的极其重要的作用, 正在积极研究各种特殊的限压装置, 例如进一步改善金属氧化物避雷器的电气性能, 利用断路器的多级合闸并联电阻, 以及研制专用的可控电抗器等, 以便能够大幅度地降低内部过电压。  
(陈维贤)

neibu guodianya celiang  
**内部过电压测量** (internal overvoltage measurement) 主要内容是测量内部过电压的幅值和波形, 目的是为了获得真实的内部过电压特性, 以便采取防止和限制措施。内部过电压测量系统主要由过电压记录仪、分压器和信号传输装置组成。测量方式通常有专门测量和在线自动记录两种。工业发达国家从 20 世纪 40 年代起, 中国从 50 年代起开始进行内部过电压的测量工作。

过电压记录仪 用来记录内部过电压的幅值或波形的仪器, 常用的有振子示波器、机械扫描电子示波器、过电压幅值记录仪、记忆示波器、磁带数据记录仪以及故障录波仪等。

(1) 振子示波器。一种通用的示波器, 从 20 世纪 50 年代起在电力系统和实验室中广泛用来记录过电压波形。它由振子、光学系统和摄影装置三部分组成。光学系统的光源最初是采用普通白炽灯泡, 60 年代改用紫外线灯泡。用紫外线灯泡作光源的振子示波器也称为光线记录示波器。过电压信号电流通过固有频率很高的振子, 使处在磁场中的振子及小镜片发生偏转, 小镜片将光学系统来的入射光反射聚焦到摄影装置内的感光材料 (胶片、感光纸或紫外线感光纸) 上。随着镜片的偏转, 光在感光纸上成水平方向移动, 移动的距离与通过振子的电流大小成正比。摄影装置带

动感光纸沿光线的垂直方向运动,将信号展开成波形,并记录在感光纸上。常用的光线记录示波器可同时记录多个信号,有 8、10、12、16、24 几种。感光纸走纸速度可分档调节,根据被测信号频率选择。记录信号频率主要受振子特性限制,常用振子固有频率有 400、1200、2500、5000Hz 几种,一般最大测量频率为振子固有频率的 1/3 左右。在现场进行过电压测量时,振子通常接在电磁式电压互感器的二次侧,由于电磁式电压互感器的频率特性差,在过电压下发生饱和等原因,不能真实反映高频、高幅值过电压的特点,使振子示波器在现场过电压测量中受到限制。

(2) 机械扫描电子示波器。20 世纪 50 年代至 80 年代初,在电力系统现场过电压测量中广泛使用这种由电子示波器和机械扫描装置组成的示波器。其中电子示波器采用短余辉示波管,信号采用水平输入,不用扫描发生器;机械扫描装置也是摄影装置,包括摄影镜头和感光纸传动部分,通过感光纸的运动将荧光屏上水平方向的信号展开成波形,并记录在感光纸上。感光纸传动部分有转鼓式和连续式两种,转鼓式用于记录过程短、频率高的过电压波形,连续式用于记录过程长的过电压波形。一般记录频率范围为 0~20 kHz,可同时输入 2~15 个信号。

(3) 过电压幅值记录仪。由峰值保持电路、比较电路和计数器构成的记录过电压幅值的仪器。20 世纪 70 年代起在电力系统中开始使用。该记录仪装于变电所,通过分压器接入被测母线或线路。根据系统可能出现的过电压范围,设置 5 档比较电压值,对应于 5 个过电压倍数(如 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 倍)。当信号电压峰值超过所设定的比较电压时,计数器就加 1,以记录电压峰值超越的次数。过电压幅值记录仪长期在线运行,可自动记录系统中随时出现的幅值超过设定值的过电压累计次数。该记录仪不仅可以记录内部过电压幅值,也可以记录雷电过电压幅值。

(4) 记忆示波器。20 世纪 70 年代后期起,在电力系统进行隔离开关投、切空载母线试验时,常用记忆示波器来记录高频暂态过电压波形。记忆示波器种类很多,如暂态记录仪等。近年来一般采用性能较好的数字存储示波器,它有一个或多个模拟量输入通道,可将模拟量转换成数字量进行存储,并实现屏幕显示波形,还有数字量或模拟量输出接口。暂态记录仪与数字存储示波器原理相同,只是它本身无屏幕显示,需通过计算机或其它显示设备显示波形。记忆示波器主要用于记录高频信号,最高可记录的信号频率达几百兆赫。

(5) 磁带数据记录仪。20 世纪 80 年代起广泛使用,目前已完全代替了机械扫描电子示波器和振子示

波器。磁带数据记录仪采用模拟量输入和输出,用数据磁带保存波形。常用的磁带数据记录仪具有 7、14 或 21 个输入和输出通道,有两种放大器,测量频率范围分别为 0~20 kHz 和 0.2~200 kHz,用其它示波器接到输出端来显示记录的波形。近年来,厂家在提供磁带数据记录仪时,同时提供与其配套的微型计算机控制与数据处理系统,将磁带上保存的波形在屏幕上显示,并进行一般性的数据处理,如算出过电压的幅值等。中国开发的磁带数据记录仪的微型计算机控制与数据处理系统,具有较强的专业性,其数据分析软件是按过电压专题研究的需要来设计的,在磁带数据记录仪记录的相对地过电压的基础上,可以给出相对地、相间和断路器断口间等过电压的波形、幅值、波头长度、相关分析和统计分析等数据,丰富了过电压测试和数据分析的内容。

(6) 故障录波仪。一种在线运行、能自动记录电力系统中随时出现的过电压波形的仪器。先后在电力系统中使用的有笔录式、振子示波器式、磁带记录式和电子计算机式等。

分压器 用来将高电压的信号转换成适合过电压记录仪记录信号的装置。常用的分压器有电容分压器、电阻分压器和阻容分压器三种。

(1) 电容分压器。常用于 110 kV 及以上电压等级的交流电力系统内部过电压测量。电容分压器由高压和低压电容器串联组成,高压电容器一般利用现场运行设备的电容来实现(如耦合电容器、变压器和电抗器套管、穿墙套管以及电流互感器的芯线对末屏的电容),低压电容器按需要配置。

(2) 电阻分压器。一般用于交流配电系统和直流系统内部过电压测量。电阻分压器由电阻串联组成,高、低压电阻值根据被测系统电压专门配置。

(3) 阻容分压器。用于要求有较高精度的高压系统的内部过电压测量。阻容分压器的高、低压臂均由电容和电阻并联组成,其分压参数根据被测系统特性专门设计。

信号传输装置 将分压器的二次信号传到过电压记录仪的装置。一般由双屏蔽电缆、匹配电阻、二次分压器和过电压保护装置组成。

专门测量 在电力系统中,为了某一目的(如考核设备、事故分析、校验绝缘配合设计等)而在现场专门组织的内部过电压试验,并用专用仪器进行过电压波形和幅值的测量。为了保证运行设备的安全,现场过电压试验的内容和系统条件受到一定的限制,难于获得电力系统可能出现的最严重的过电压特性。

在线自动记录 将过电压记录仪安装在变电所,长期在线运行,自动记录系统中随时出现的过电压幅

值或波形。它可以获得系统中在不同运行方式、正常和事故操作时出现的过电压特性，并由此得出系统中过电压的统计规律。

(李同生 史六如)

neijueyuan

**内绝缘** (inner insulation) 不与大气直接接触的绝缘部件。其耐受电压值基本上与大气条件无关。一般来说，内绝缘是固体、液体、气体等绝缘材料组成的复合绝缘，例如变压器类设备的内绝缘主要是油纸绝缘，包括绕组的匝间、层间及对地绝缘。这类绝缘结构在过电压的多次作用下，会因累积效应使绝缘性能下降。一旦绝缘被击穿或损坏，不能自动恢复原有绝缘性能，故一般属非自恢复型绝缘。

(方 瑜)

nibiancexiaoliu dianwang guzhang

**逆变侧交流电网故障** (faults of AC network on inverter side) 直流输电受端交流系统中发生的故障。包括三相短路、两相短路、两相对地短路和单相短路以及断线。直流输电的逆变器必须在受端交流系统提供的换相电压支持下才能正常工作。交流电网故障会使逆变站交流母线电压的大小、相位和波形发生不同程度的变化，这些变化可能引起逆变器控制系统的同步基准信号消失、阀触发电路的储能不足以及逆变侧换流器换相失败等。其中引起换相失败的几率远比前二者大得多，也比整流侧交流电网故障对直流输电的影响严重。因此，逆变侧交流电网故障对直流输电系统的影响往往以是否会引起换相失败或换相失败后能否自行恢复正常运行来衡量。交流三相对称短路主要是交流母线提供的换相电压下降对逆变器换相过程产生影响。不对称故障除了降低换相电压外，还引起换相电压过零点的不对称移动，从而又直接影响到换流阀的关断角，通常不对称故障对关断角大小的影响比对称故障的影响更大。

**三相对称短路的影响** 故障引起逆变站交流母线电压三相对称下降，下降程度随电网中故障地点离逆变站的远近不同而变化，当直流系统采用低电压减电流等控制措施后，在较大的电压变动范围内直流系统仍能保持运行，此时逆变器的触发角受关断角整定值限制，直流运行电流由整流器定电流控制的电流整定值来确定。故障引起的交流母线电压严重下降时，会引起逆变器运行的触发角大于  $60^\circ$ ，从而使逆变器的实际关断角减小。当实际关断角小于极限关断角时，逆变器将发生换相失败故障。由换相电流关系式可推导出下列三相交流电压下降不会造成逆变器发生换相失败故

障的极限下降系数，即

$$K = \frac{\sqrt{2} \omega L_c I_d}{U [\cos \delta_0 - \cos (\delta_0 - \delta_{\min} + 60^\circ)]}$$

式中  $K$  为换流站交流母线电压下降系数； $\omega L_c$  为换相电抗， $\Omega$ ； $I_d$  为直流运行电流，A； $\delta_0$  为关断角整定值； $\delta_{\min}$  为极限关断角； $U$  为故障前交流母线线电压有效值，V。

**不对称短路的影响** 交流系统不对称短路会使逆变站交流母线各相电压大小和相位发生不同程度的变化，从而影响逆变器能否稳定运行。各相电压大小的变化和相位移动除了与故障发生的地点有关外，还与故障类型有关。与三相短路故障相似，发生不对称故障时，换流阀的实际关断角有可能小于其整定值，从而引起换相失败故障。

(赵礼生)

nianxing jinzi zhijueyuan dianlan

**粘性浸渍纸绝缘电缆** (mass-impregnated paper insulated cable, MI cable) 一种用纸带绕包在导线上到规定的绝缘厚度后，用粘性油浸渍的电力电缆，又称固式绝缘电缆。主要用在 35 kV 级及以下的电力电缆线路中。按结构的不同，可分为带绝缘电缆、屏蔽型电缆和分铅型电缆。

以 0.1~0.18 mm 厚的纸带绕包在导线的线芯上，纳入密封缸中，加热至 120~130℃，进行抽真空干燥，之后将另一缸内的粘性浸渍剂，加热至同样温度，灌入电缆缸，使纸纤维间和绝缘层内所有空隙充满浸渍剂，再冷却至室温。这样可避免浸渍剂冷却时产生收缩气隙。浸渍后的电缆，挤套上一层密封的金属套，然后按需要，可在金属套外加包钢带或钢丝铠装，以加强抗机械损坏性能。

浸渍剂的粘度随电缆温度高低而变化，当电缆线路敷设有坡度时，高处的浸渍剂有下淌至低端的倾向。下淌的后果，在远处就缺少了浸渍剂，形成了空隙，降低了绝缘的电气强度，最终会导致绝缘击穿。在低端浸渍剂容易溢出或者由于内部静油压力过大而使金属套胀破。为了尽量减少这些原因造成的损坏，这种电缆的最高和最低点的垂直位差，对于 10 kV 和 35 kV 的电缆分别不宜大于 15 m 和 5 m。

20 世纪 40 年代前，35 kV 级及以下电力电缆线路主要使用粘性浸渍纸绝缘电缆，这种电缆当时被誉为工业电气化的牢固支柱，因此就称之为固式绝缘电缆。由于它受位差的限制，50 年代逐渐被不滴流电缆代替。60 年代后发展了固体挤压聚合电缆，多数国家就又以它取代了纸绝缘电缆。有些国家因为拥有纸绝缘电缆的运行经验，迄今尚未全部摒弃，但固体挤压聚合

电缆的性能正在不断改进，油浸纸绝缘电缆最终将会被淘汰。

参考书目

Barnescc. Electric Cables. London: Pitman Press, 1964

(陆德纭)

nongcun peidianwang

农村配电网 (rural distribution system)

供应县(县级市)范围内的农村、乡镇、县城用电的电力网,简称农网。其主要负荷是农业用电与郊区用电,也包括乡镇企业的工矿用电和商业用电,以及居民生活用电。农村配电网的供电地区范围与城市配电网的不同,它以地区供电、配电为主,电压等级在 110 kV 及以下,包括大量的小型农村变(配)电所,以及长线路、多分支、低负荷与用户分散的线路等。(见配电网)

中国规定,县(县级市)和县以下的配电网统称为农村配电网,其中包括县城和乡镇的配电网,及其郊区的农村变(配)电所与农村配电线,不论它是供应农业用电,还是只供郊区的非农业用电,在业务管理体制与电量统计方法上,都是按此划分的。其他国家所称的农村配电(rural distribution),多是指农村变(配)电所和多分支的长配电线,其技术重点主要是长配电线分段自动调压、多分支线供电可靠性以及户外高压电气设备的技术性能问题。各国所称的郊区配电(suburban distribution)与农村配电有共同的技术特点,更突出的是供给公路沿线的分散居民和分散用电点。

中国的农村配电网包括了县城配电网与供应乡镇企业用电的配电网,而中国的乡镇企业又正在蓬勃发展,城乡用电上的差别正在逐步缩小,城乡配电技术与设施、设备等也将逐步接近。农网中的县城配电网,在发展中将与小城市的城市配电网具有许多共同点。此外,农网也还有若干适应农村特点的技术措施。

农网供电方式 一些国家的农网供电方式,曾经采用或仍在采用两线一地制配电的方式。中国由于推行“县县有电”的政策并急于达到目标,而又受限于设备、器材供应,曾经采用过两线一地制配电,但现已停止发展,并在逐步改回三相四线制(见供电方式)。在美国,由于一次配电电压采用中性点直接接地系统,有的农村配电方式和郊区配电方式,曾经采用高低压共用中性线的单相供电方式,以节省线材并简化设备,如接地的一端可以不用绝缘套管。

中国的农网供电方式,与城网的供电方式完全一致。

农村变电所 农村配电网中,以向农村供出 10kV 配电线路为主的小型变电所。其电源侧电压一般为 35

kV 或 63 kV,也有采用 110 kV 的。农村变电所供出的 10 kV 配电线路,大部分是提供郊区农业用电,其特点是:①配电线长,调压成为重要问题;②经过的地区比较空旷,自然条件差,事故率高,且多具瞬时性,需要有效的自动重合措施;③配电线的分支多,负荷分散,故障查寻困难,故切除故障分支,重合非故障部分,成为必要措施;④农村负荷小,分布面积广,受农业生产季节性影响,负荷峰谷差别较大,农用配电变压器(10/0.38 kV)平均负荷率很低;⑤农村配电线的无功负荷(包括配电变压器的无功负荷和感性用电设备的无功负荷),主要集中在低压配电线路上,因而低压无功补偿是重点;⑥农村配电网的建设受经济条件的限制,远景规划与近期要求难以一致,电网发展规模不能一步到位。

农村变电所的发展方向是:小容量,密布点,短供电半径;户外型,小型化,工厂成套供应;安全可靠,技术先进,设备自动化。农村变电所的电气主接线以简单、可靠为主,主变压器的高压侧多由负荷开关与熔断器(见跌落式熔断器)组成变压器保护;10 kV 出线侧采用自动重合器作为出线保护,可与配电线路的各分段及各支线采用的自动分段器、熔断器相配合;不需设立专用的控制室,可与 SCADA 系统结合建立无人值班变电所。

自动重合器 由断路器、操动机构、操作电源和保护控制装置组成的能够自动控制的开关设备。它可以开断短路电流,并可根据保护方式的要求自动重合,还可再开断再重合连续若干次,不成功即自动闭锁。它可以作为农村变电所 10 kV 出线的开关设备,也可以用于较长配电线或较多的分支线上,起分段保护及重合作用。自动重合器的功能,主要是能自动恢复农村配电线路瞬时性故障后的供电,可以多次(一般三次)重合,重合成功后,起到不影响或少影响用户用电的作用。它有若干条安秒特性曲线,可与上下级保护设备配合。自动重合器与自动分段器配合,可自动隔离配电线路的永久性故障部分,使非故障线路部分照常供电,更可以缩小故障停电范围,大大提高供电可靠性。(见自动重合器)

自动分段器 由开关、操动机构和控制装置三部分组成装在配电线路上的开关设备。它不能开断短路电流,但可以关合短路电流,同时也能手动开断或关合负荷电流。分段器通常是与具有开断和重合短路电流能力的上级开关设备(如断路器或重合器)配合使用,对线路起隔离、分段作用。分段器能够记忆短路电流出现的次数,达到整定计数次数后,可在无电流情况下自动切断故障段。(见自动分段器)

自动配电开关 其功能与自动分段器类似,特点



是能对线路故障进行判断，并在上级保护的开关设备分断后，可进行自动分闸并合闸闭锁。它与自动分段器的主要区别是它具有自动合闸的功能，对故障的判断，是由电压存在的时间来确定的。自动配电开关的延时合闸功能，可以区别故障是由那一级配电开关引起的。它的操作电源及控制信号，均由配电开关电源侧的电源变压器供给。（见自动配电开关）

**农用配电变压器** 由于农业用电的时间性与季节性都很强，因而形成平均负载率很低，其空载无功功率损耗占很大比重。农用配电变压器数量很大，分布又很广，是提高供电效率的关键设备。除可以及时停运空载的变压器外，研究采用新型的空载损耗低的变压器，是农业用电节能的重要手段。美国、日本已在农用配电变压器中，开始采用非晶型铁芯变压器，其空载损耗可降低 80% 左右。中国也正处在研制阶段。

**农村配电的无功补偿** 其技术方针是全面规划、合理布局、分级补偿、就地平衡；集中补偿与分散补偿相结合，以分散补偿为主；高压补偿与低压补偿相结合，以低压补偿为主；调压与降低电能损耗相结合，以降损为主。对于长配电线路与多分支配电线路的无功补偿，尤应强调以低压分散和就地补偿为主。一般都是用高压或低压并联电容器组作为补偿设备。

**农村配电的低压无功补偿**，分为三种方式：①电动机就地补偿（简称随机补偿）；②变压器就地补偿（简称随器补偿）；③低压集中补偿。随机补偿与随器补偿的效果较好，但都需要安全可靠且容量配套的低压电容器。随机补偿的并联电容器的补偿容量，不能大于电动机的空载励磁功率，以免在电源切断后电动机发

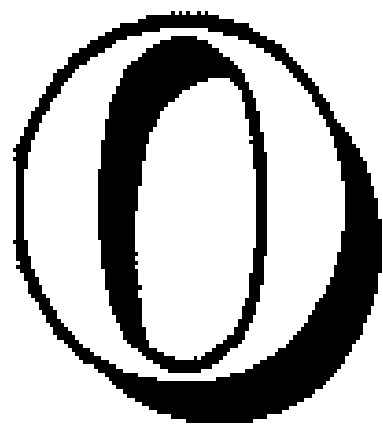
生自励过电压而损坏电动机与并联电容器。随器补偿的并联电容器的补偿容量不能大于变压器空载励磁功率，以免在电源缺相时（如熔断器未同时闭合等原因），产生铁磁谐振过电压。中国多采用低压集中补偿，一般有两种方式：①固定连接的并联电容器组，以补偿固定的基本无功负荷；②若干并联电容器组，其中包括固定连接组与可投切连接组，投切方式可以是手动，也可以是自动。（见配电网无功补偿）

**农村配电的调压措施** 农村负荷与城市远郊区负荷主要是以 10 kV 配电电压供电。有些国家采用 20 kV 级电压代替 10 kV 配电，以延伸配电距离和提高供电容量。农村配电与远郊区配电的电压调整，主要有以下几项措施：

- （1）变电所采用有载调压变压器或分级调压器（step voltage regulator），以手动或自动方式保证母线电压为恒定值，中国采用有载调压变压器；
- （2）配电出线常采用出线分级调压器，以调整不同长度配电出线所需的电压值；
- （3）特长配电线路也可在线路途中的电杆上安装自动调压器，多为分级调压器，美国常采用此种设备；
- （4）有些特长线路，还可安装串联升压变压器，以提高后一段线路的电压；
- （5）串联电容器在长配电线路上的使用，也可改善线路末端电压，但应注意线路参数和串联电容参数的适当配合，防止发生异常的电压低频变化。

见输配电网的无功补偿与电压调整、配电网电压调整、配电网无功补偿。

（徐博文 陈 期 徐腊元）



ouhe dixian

**耦合地线** (coupling ground wire) 架设于输电线路相导线下的接地导线。在雷电活动强烈的地区和经常发生雷击故障的杆塔和线段，可增设耦合地线。当雷击杆塔或避雷线时，耦合地线可使避雷线和输电线间的耦合系数增大，并使流经杆塔的雷电流向两侧分流，从而提高线路的耐雷水平。计算表明：110 kV 单避雷线线路，增设耦合地线后，耦合系数增大一倍以上；双避雷线线路，增设耦合地线后，耦合系数增大约 50%。耦合地线可使杆塔雷电流分流 12%~22%。在降低 110 kV 线路的雷击跳闸率方面，增设耦合地线比改用消弧线接地方式更有效。

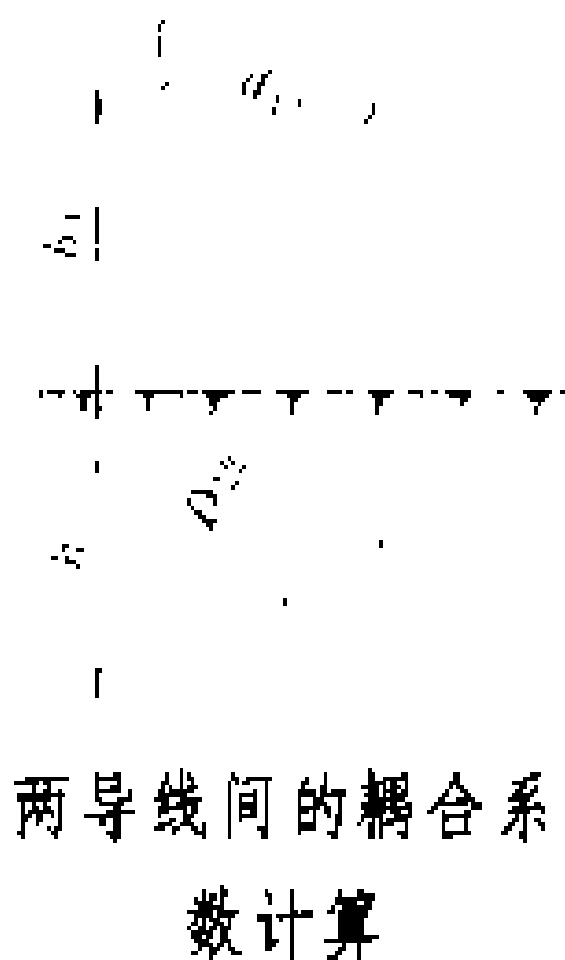
为防止大风、覆冰脱落时导线与耦合地线碰线短路，以及雷击杆塔时反击导线，在一般条件下，耦合地线和导线在档距中央的垂直距离，110 kV 线路不宜小于 3 m，220 kV 线路不宜小于 5 m。重冰区这一距离还应加大。

(王 遵)

ouhe xishu

**耦合系数** (coupling coefficient) 两导线相互平行，电磁波(其电压为  $u_1$ )沿其中一根导线

(导线 1) 传播时，由于电场和磁场的耦合作用，在另一根导线(导线 2)上会感生出耦合波(其电压为  $u_2$ )。 $u_2/u_1$  称为导线 1 和导线 2 之间的耦合系数，用  $k$  表示，其值小于 1。



线路防雷中常用耦合系数来计算雷击避雷线(相当于导线 1)时，避雷线和输电线(相当于导线 2)间的电位差，即

$$u_1 - u_2 = u_1 (1 - k) \quad (1)$$

如图所示，在单避雷线时，耦合系数的计算公式为

$$k = \frac{\ln \frac{D_{12}}{d_{12}}}{\ln \frac{2h_1}{r_1}} \quad (2)$$

式中  $r_1$  为导线 1 (即避雷线) 的半径，m； $h_1$  为导线 1 的高度，m； $d_{12}$  为导线 1 和导线 2 间的距离，m； $D_{12}$  为导线 2 与导线 1 在地中的镜像之间的距离，m。

导线 1 在受雷击时可产生强烈的电晕现象，等于其半径加大，此时耦合系数将加大，应由式 (2) 的值再乘以校正系数  $k_1$ 。 $k_1$  值见下表。

耦合系数的电晕校正系数  $k_1$

线路额定电压 (kV)	20~35	60~110	154~330	500
双避雷线	1.10	1.20	1.25	1.30
单避雷线	1.15	1.25	1.30	—
无避雷线	1.15	1.25	—	—

增大耦合系数可以提高线路的耐雷水平，降低其雷击跳闸率。

(陈慈萱)

P

padian biju

爬电比距 (specific creepage distance)

设备绝缘的爬电距离与最高工作电压之比，单位为毫米/千伏 (mm/kV)，曾称泄漏比距。爬电距离是指两个导电部分之间沿绝缘材料表面的最短距离。当已确定外绝缘所处地区的污秽等级后，根据要求的最小爬电比距和最高工作电压  $u_m$ ，即可决定外绝缘的尺寸 (例如绝缘子的片数)。

外绝缘按最小公称爬电比距和人工污秽耐受值分为 0，Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ 五级。0 级适用于无明显污秽的

地区，不需进行人工污秽试验。各级相应的最小公称爬电比距见表 1。普通盘形悬式绝缘子和户外用棒形支柱绝缘子的人工污秽耐受值 (固体层法) 与污秽等级的关系如表 2 所示。非正常型 (耐污型) 外绝缘或绝缘子，在按污秽等级 (即按表 2 中的等值盐密) 选定最小公称爬电比距 (表 1) 时，必须以按照该造型进行的不同盐密下的污闪电压为依据。

表 1 最小公称爬电比距分级数值

外绝缘污秽等级	最小公称爬电比距 (mm/kV)	
	线 路	电站设备
0	13.9	14.8
Ⅰ	16	16
Ⅱ	20	20
Ⅲ	25	25
Ⅳ	31	31

注：中性点绝缘或经消弧线圈接地系统的 3~63 kV 级线路和电气设备的外绝缘污秽等级一般可按Ⅰ，Ⅱ，Ⅳ级选取；330 kV 级线路和电气设备外绝缘在 0 级时分别为 14.5 和 15.5 mm/kV；额定电压 500 kV 级外绝缘可参照使用。

表 2 人工污秽耐受值与污秽等级的对应关系

污秽等级	普通盘形悬式绝缘子				户 外 棒 形 支 柱 绝 缘 子			
	污层导电率 (μS)		等值盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )		污层导电率 (μS)		等值盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )	
	范 围	参考值	范 围	参考值	范 围	参考值	范 围	参考值
Ⅰ	5~10	7	0.020~0.030	0.025	5~10	7	0.012~0.020	0.015
Ⅱ	12~16	14	0.050~0.070	0.060	12~16	14	0.020~0.040	0.030
Ⅲ	18~25	21	0.10~0.15	0.12	20~25	21	0.040~0.080	0.060
Ⅳ	30~35	32	0.20~0.30	0.25	(30~40)	(36)	(0.080~0.160)	(0.120)

注：括号内数值是根据Ⅰ~Ⅲ级数据外推得到的。

(王秉钧)

peidian biandiansuo

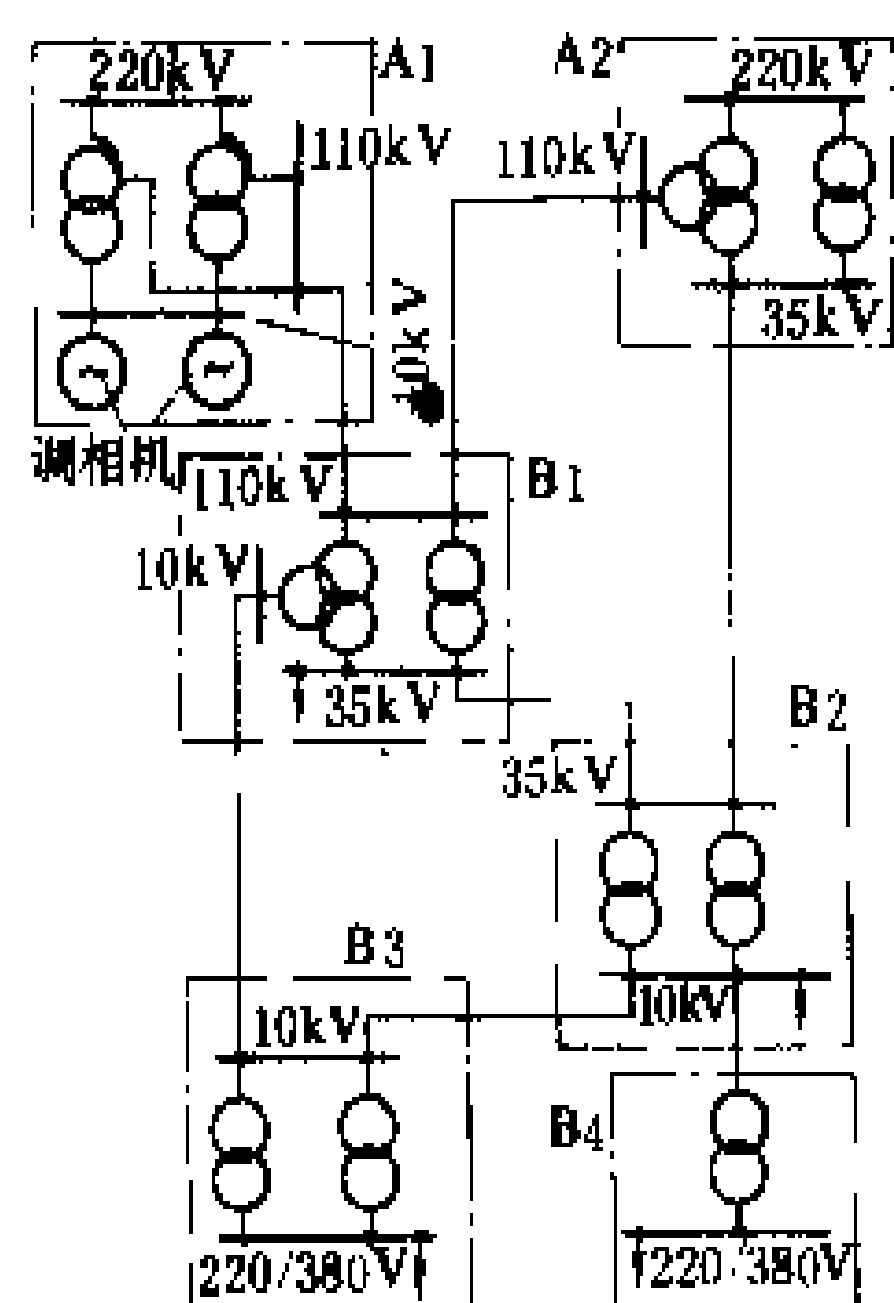
配电变电所 (distribution substation)

变换供电电压、分配电力并对配电线路及配电设备实现控制和保护的配电设施。它与配电线路组成配电网，实现分配电力的功能。配电变电所接受电力的进线电压通常较高，经过变压之后以一种或两种较低电压为出线电压，输出电力。在中国，对于 10/0.4 kV 配电变电所 (即中压配电变电所) 中具备配电和变电功能的，常简称为配电所；而对于高、中压配电变电所中不具备变电功能的，常简称为开关站。安装在架空配电线路上的作配电用的变压器 (包括杆上或地面上的)，实际上是一种最简单的中压配电变电所，其接线简单，一路中压进线，经变压后以低压线路沿道路的各个方向分成几路向用户供电。在变压器的高、低压侧分别装有

跌落式熔断器和熔丝作为过电流保护，装有避雷器作为防雷保护。这种中压配电变电所常被简称为配电变压器。

配电方式和配电电压 配电变电所的配电方式一般有三种：①从配电变电所直接向用户供电；②从配电变电所连接到配电网上再支接到用户；③通过配电线路连接到另一座配电变电所，经过再次降压后向用户供电。各国配电电压主要有：127/220 V、220/380 V、3.3 kV、6.6 kV、10 kV、22 kV、33 kV、63 kV、110 kV、132 kV、138 kV 等。中国的国家标准中关于公用配电网的电压标准规定为：220/380 V、10 kV、35 (63) kV、110 kV。如图所示为各级电压配电变电所的原理性连接电路图。

功能和设备 配电变电所具有变换和调整电压，



各级电压配电变电所的原理性  
连接电路图

汇集和分配电能，对配电线路和变配电设备实施继电保护和自动化的功能。一般由下列配电设备构成：主变压器、母线、断路器、隔离开关、互感器和继电保护、通信、自动化等装置，以及各种仪表和显示器。根据配电网或电气接线的需要，配电变电所中

置在就近用户地带。配电所进线电压一般为中压（10 kV），从中压母线上接出数路中压配电线向中压配电网及中压用户供电，还设置有中压/低压配电变压器及低压配电装置，配电变压器一般为1~2台，每台容量在数百千伏安至一千千伏安左右。

中国的高压配电变电所一般为有人值班，而中压配电变电所一般为无人值班。

**发展趋势** 随着城市建设不断发展，环境要求不断提高，以及电网容量和负荷密度的不断增大，而且现代化电力用户对电能质量与供电可靠性要求更高，因而新建配电变电所在设备、接线、管理等方面有以下发展趋势：①增大容量和简化接线。变压器和断路器力求容量大，可靠性高。主接线力求简化，如采用线路-变压器组、单母线分段接线和大容量高压熔断器。②小型化以及与环境协调。为使配电变电所占地少，满足防火、无噪声污染和外观协调等要求，建设在城市的配电变电所趋向于采用屋内式多层结构，主设备多采用真空、SF<sub>6</sub>气体绝缘和干式绝缘的小型电气设备及其组合装置，采用低噪声变压器、干式变压器或耐燃绝缘油变压器、阻燃型防火电缆涂料等设备和材料，建筑色彩和场地绿化力求与环境协调。③发展并采用少维修或不需维修的配电设备，例如SF<sub>6</sub>气体绝缘全封闭配电装置等。④将配电变电所建在地下或半地下，并与其他建筑结合成多层结构，合用土地，以解决城市中用地困难问题。总之，配电变电所的发展趋势，一方面而是设备的现代化，另一方面是控制的自动化。

参见彩图插页第25页75图。

（邵文灿）

peidian biandiansuo yunxing jianxiu

**配电变电所运行检修** (distribution substation operation and maintenance)

为保证配电变电所设备安全运行，保持额定出力和持续地为用户提供合格电能而采取的技术措施。其内容包括正常运行工作、异常情况处理、设备检修和技术资料管理四个方面。

**正常运行工作** 包括监视和控制、记录、设备巡视、设备维护、倒闸操作、工作票受理验收、事故处理七个方面内容。

**监视和控制** 通过控制室测量仪表和显示装置及时掌握设备的运行情况（电压、电流、功率和主变压器温度等），并随时采取手动（包括遥控）或自动操作方式对主变压器有载调压开关、同步调相机或无功补偿装置进行参数调节和设备操作，以维持母线正常电压和经济运行方式。

**记录** 按照规定的时间和项目，通过人工或自动

**分类及特点** 配电变电所按其结构型式不同，可分为屋外式、屋内式、地下式、组合式四类；按其进线电压等级不同，可分为高压配电变电所（35~150 kV）和中压配电变电所（1~20 kV）；按其产权所属不同，可分为电业配电变电所和用户配电变电所；按其管理方式不同，又可分为有人值班和无人值班配电变电所。

(1)屋外式配电变电所。其主变压器、断路器等主回路电气设备全部装在屋外，仅配电盘等控制装置装在屋内。

(2)屋内式配电变电所。其主变压器、断路器等主回路电气设备全部装在屋内。若主变压器或断路器等部分主回路电气设备装在屋外，则称之为半屋内式配电变电所。

(3)地下式配电变电所。其所有电气设备均装在地面下，仅有冷却装置在建筑顶部或地而上。有一部分建筑高出地面的称为半地下式配电变电所。

(4)组合式配电变电所。整个配电变电所设备由一个或几个可吊装运输的金属箱体组合而成，亦称箱式变电站。若变电所设备安装在车、船等可移动的运载工具上的，亦称为移动式变电站。

配电变电所结构型式的选择，须根据电压等级、负荷容量、用电难易程度、环境污秽情况和投资经济效益等多方面因素，进行综合比较决定。

在中国，一般220 kV变电所的出线电压为110、35 kV，如图中的A1、A2；高压配电变电所的进线电压为110 kV或35 kV，出线电压一般为10 kV，如图中的B1、B2，通常设置在接近供电地区负荷中心地带；中压配电变电所进线电压一般为10 kV，出线通常以380/220 V电压供给用户，如图中的B3、B4，一般设

装置对运行数据、调度指令和操作、施工、检查、事故处理等情况进行记录。

**设备巡视** 按照规定的周期和项目,沿指定的巡视路线进行设备检查和切换装置试验,以预防设备事故。凡当高温、严寒、雷害、迷雾、台风和汛期时,要分别按重点检查项目进行特殊巡视。根据设备缺陷的等级,按职责范围加以消除或隔离。

**设备维护** 根据所处环境和规定的周期与项目,进行场地清洁、设备清扫、绝缘子更换、带电水冲洗、带电测温和蓄电池维护等工作,以维持设备处于完好状态。

**倒闸操作** 根据调度指令,由核准的人员进行电气操作及监护。

**工作票受理验收** 按照安全工作规程,通过审票、核对、完成安全措施并会同工作负责人现场安全检查和许可(包括工作票连续、间断、转移的许可)等进行工作票受理。施工结束,会同工作负责人进行设备检查、验收,并办理工作票终结手续。

**事故处理** 配电变电所内发生事故或配电网事故引起断路器跳闸时,值班运行人员要迅速、准确地判断和处理,以限制事故扩大和尽快恢复供电,同时向值班调度员汇报并接受命令。

**异常情况处理** 主要有电力系统频率、电压异常,系统振荡,配电网单相接地,变压器过负荷,变压器轻瓦斯保护动作及配电装置其他异常情况。

**电力系统频率、电压异常** 根据《全国供用电规则》,供电频率允许偏差为:电网容量在300万kW及以上者为 $\pm 0.2\text{ Hz}$ ,300万kW以下者为 $\pm 0.5\text{ Hz}$ 。一般认为频率超出 $50\pm 0.2\text{ Hz}$ 为不合格,超出 $50\pm 0.5\text{ Hz}$ 为异常情况,要加强运行状态和自动低频减载装置的监视。母线电压越出限值时,加强对主要变压器有载调压开关、无功补偿装置和自动控制装置的监视与控制。

**系统振荡** 电流、电压、功率表计出现周期性剧烈摆动时,要密切监视其变化和尽量增加无功容量、母线电压,同时做好减负荷操作准备。

**配电网单相接地** 对中性点不接地和经消弧线圈接地的配电网允许单相接地运行,但一般不超过2h。除检查所内设备情况和线路接地检测装置外,可在调度许可下进行线路试拉闸以寻找接地故障线段。同时,要加强对消弧线圈、接地变压器和电压互感器等设备的监视。

**变压器过负荷** 当变压器的负荷超出规程允许时间内的正常过负荷数值时,一般按过负荷10%以上或变压器上层油温 $80^{\circ}\text{C}$ 以上时,在加强监视的同时,要求调度所调整负荷或按紧急减负荷程序拉闸减负荷。

**变压器轻瓦斯保护动作** 出现变压器轻瓦斯动作信号时,除进行变压器和瓦斯保护装置检查,以排除油系统进入的空气和二次回路故障等原因外,应记录瓦斯气量并收集气体,进行颜色观察、嗅味和可燃性检测等初步分析,并进一步采集瓦斯气样和本体油样一并进行色谱分析,以便及时判断变压器内部故障情况。

**配电装置其他异常情况** 常见的有:接点发热,示温蜡片熔化、移位;套管、绝缘子有裂纹或放电的痕迹;注油设备油位过低、渗漏油;不正常的振动或放电声;操作或电气试验中出现的其他异常情况。配电装置出现异常情况时,一般采取转移负荷、加强通风、带电清扫、带电注油等措施,禁止有可能危及人身和设备安全的操作,在缺陷消除前要密切监视,及时报告,申请停电处理。

**设备检修** 包括预防性试验、定期小修(一般检修或表计、继电保护检验)、定期大修(解体检修或表计、继电器更换)和临时检修四个方面的内容。

**预防性试验** 揭露设备内部缺陷,判断设备能否继续运行的重要措施。各种设备的预防性试验项目、周期和标准,按现场电气设备预防性试验规程执行。

**定期检修** 以搞清和保持设备现有性能为目的,定期从外部进行普通检查修理的为定期小修;以恢复设备原有设计性能为目的,定期通过解体进行细致检查修理的为定期大修。检修项目、周期和标准,一般按照现场运行规程、检修工艺导则,结合设备具体情况和检修经验制订。

**临时检修** 油断路器经多次事故跳闸后,或其他设备有异常情况,或同类设备中已发生重大事故时,根据需要进行临时检查修理。

**技术资料管理** 配电变电所运行检修工作应具备的规程和资料有:①上级电力管理部门制订的技术管理有关规定;②电力部门制订的安全工作规程;③电力系统调度管理规程;④现场运行规程;⑤电气设备交接试验规程,预防性试验规程;⑥电气装置安装工程施工及验收规范;⑦反事故技术措施;⑧电气事故处理规程;⑨电气测量仪表监督条例和仪表检验规程;⑩继电保护及安全自动装置检验条例和继电器检验规程;⑪事故备品及生产备品、材料储备定额管理规定;⑫设备检修工艺导则和检修规程;⑬设备技术登记簿;⑭制造厂的设备技术文件;⑮电气及土建竣工图;⑯继电保护及自动装置整定书;⑰各种系统图和操作模拟图板;⑱运行、检修记录。某些国家的电力管理部门已经对技术资料利用计算机辅助管理,工作质量和效率都得到了提高。(见配电网计算机辅助管理)

(邵文灿)

peidian biandiansuo zaosheng

# **配电变电所噪声** (distribution substation noise)

配电变电所电气设备及其附属设备在运行时产生的可听噪声。110 kV 及以下的配电变电所噪声主要是电力变压器本体及其冷却系统产生的电磁性、机械性和空气动力性噪声。在 220 kV 及以上的变电所中,除了变压器噪声外,空气断路器在操作时,由于压缩空气的排放,会发出巨大噪声;配电装置导电部分及导线附近的空气在强电场中会产生电晕放电,发出噪声(见输电线路可听噪声);配电装置上某些电场较集中部位,在空气湿度较高时,产生局部火花放电,也会发出噪声。

**电力变压器噪声产生机理** 油浸自冷式电力变压器的噪声,是由其铁芯硅钢片的磁致伸缩振动和磁动态振动引起的电磁性噪声。磁致伸缩振动是由于铁芯励磁时沿着磁力线方向的硅钢片长度要增加,而垂直于磁力线方向的硅钢片宽度要缩小而引起的。由于硅钢片的各向异性,在磁通转向区内磁致伸缩振动现象更为明显。所以磁致伸缩振动与铁芯的尺寸和重量、铁芯角部的接缝形式等因素有关,细高的铁芯比粗矮的铁芯噪声低,轻的铁芯比重的铁芯噪声低,铁芯角部斜接缝的比直接缝的噪声低。磁动态振动是铁芯中间隙附近硅钢片之间磁的相互作用而引起的,因此它与铁芯装配时硅钢片上的压力、硅钢片的波浪度等因素有关,理想的条件是压力在 0.08~0.12 MPa 范围内,芯柱的不平整度小于 0.2%。采用优质冷轧硅钢片,合理的铁芯结构,完善的制造工艺以及适当的防振措施,可使变压器噪声有所降低。油浸风冷式或强迫油循环风冷式电力变压器,除了电磁性噪声外,还有风机产生的旋转噪声和涡流噪声,以及油泵产生的液力噪声。采用降低转速和优化风扇叶片设计,可以降低风机的噪声。对于油泵,除降低转速外,常采取选用精密级轴承、清除油中杂质和防止空气渗入等措施降低噪声。

**电力变压器噪声的声压级和频谱** 声压级  $L_p$  是待测声压  $p$  与基准声压  $p_0$  的比值,取常用对数后,再乘以 20 所得的值,即  $L_p=20\lg(p/p_0)$ , dB。电力变压器容量大的,声压级亦大。通常,变压器噪声的大小用 A 网络测得的声级来代表,以 dB(A) 为单位表示。容量为 6300 kV·A 及以下的中小型电力变压器声级为 50~70 dB(A);容量为 6300 kV·A 以上的大型电力变压器则为 75~90 dB(A)。电磁性噪声的频谱为 100~500 Hz,大型电力变压器以 100~200 Hz 为主,中小型电力变压器则以 200~300 Hz 为主。风机噪声的频谱比较宽。

**配电变电所噪声治理** 有些国家早期多采用在变压器周围设置隔声墙和隔声屏障的措施。隔声墙一般

是砖砌体,亦有用钢筋混凝土筑成的,其朝向声源的表面往往做成凹凸形状以吸收噪声。隔声墙高度要超过设备高度,长度宜为高度的 4~5 倍。隔声墙越厚,离声源越近,其隔声效果越好。隔声屏障是用轻质吸声材料做成的,通常架设在变压器油箱壁上。有的国家将变压器安装在封闭的隔声室内,虽然隔声效果较好,但投资费用高,占地面积多,安装、维护、检修等工作量大。20 世纪 80 年代初,美国研制了自适应控制消声装置,利用变压器噪声,应用自适应控制技术,产生二次声源以降低噪声,取得了较好的效果。中国在变电所噪声治理方面,从 70 年代末开始着手进行,有的屋外型变电所采用隔声墙、低噪声风机等措施,有的屋内型变电所则采用隔声门、进出风口的消声装置等措施。

## **参考书目**

吴广玉等,系统辨识与自适应控制,哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1987

(周于邦)

peidian bianyaqi fanglei

# **配电变压器防雷** (lightning protection of distribution transformer)

为保证配电变压器正常运行防止雷害的安全措施。配电变压器多采用 Y, yn 的接线方式,高压侧的额定电压一般为 10 kV,无中性点引出。低压侧为三相四线制,其额定电压为 220/380 V。由于和配电变压器相连的线路的绝缘水平很低(木杆线路除外),线路遭雷直击或遭受感应雷击所产生的过电压往往会由三相导线同时传入变压器,危及变压器的绝缘,特别是高压绕组中性点附近的绝缘。

图 1 为配电变压器防雷的典型接线。为了限制由高压线路传入变压器的雷电过电压,配电变压器的高

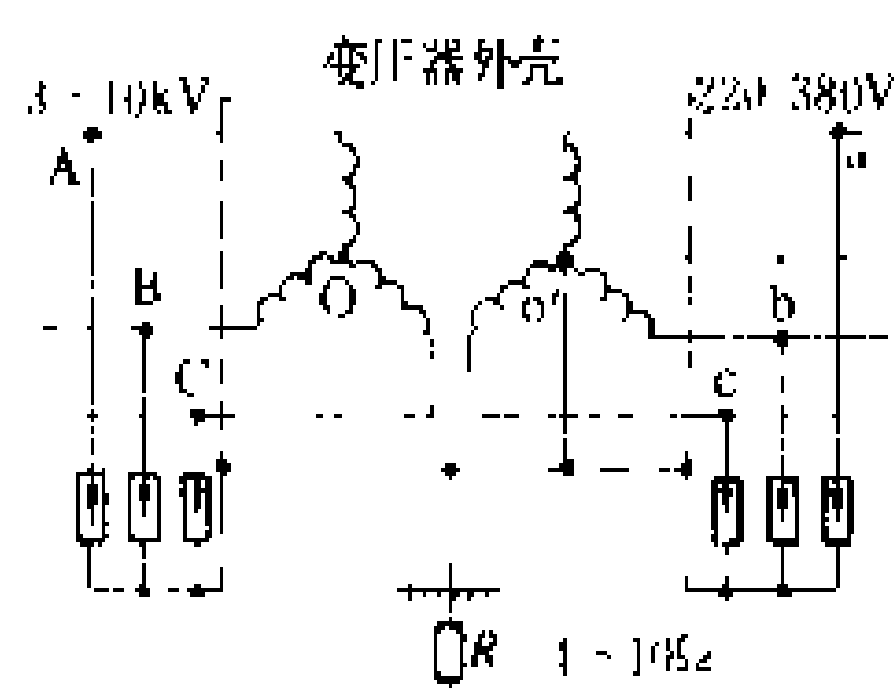


图 1 配电变压器的防雷

压侧必须装设阀式避雷器。由于 10 kV 配电系统用的阀式避雷器的残压不高(其 5 kA 时的残压约为 17~50 kV),而配电变压器

器的接地电阻  $R$  又较大(约 4~10  $\Omega$ ),雷电流  $I$  流经接地电阻  $R$  所形成的压降  $IR$  ( $I=5$  kA 时约为 20~50 kV)将与避雷器的残压相当。为避免  $IR$  和避雷器的残压叠加在一起作用到变压器上,阀式避雷器的接地端应直接接在配电变压器的外壳上。为防止避雷器动作后变压器外壳出现的高电位  $IR$  向其低压绕组反击,配电变压器低压侧的中性点也应连接在变压器的外壳上。综上所述

述,配电变压器的防雷接线必须采取三点(高压侧阀式避雷器的接地端、低压绕组的中性点以及变压器的外壳)联合接地的方式。

为了限制由低压侧传入配电变压器的雷电过电压,配电变压器的低压侧的相线和零线间要加装低压避雷器。

为减小作用在配电变压器上的过电压,阀式避雷器应尽量靠近配电变压器安装,其连接线应尽量短,因为即使是0.6 m的连接线,其电感 $L$ 就有约 $1\text{ }\mu\text{H}$ 之大,此时只要雷电流陡度 $di/dt=10\text{ kA}/\mu\text{s}$ ,连接线上的压降就会达到 $Ldi/dt=10\text{ kV}$ ,当它和避雷器的残压叠加在一起作用到配电变压器上时,就会对变压器的绝缘产生威胁。采用体积小、容量大、残压低的金属氧化物避雷器来保护配电变压器时,可以将避雷器直接装在配电变压器的箱盖上,甚至油箱内,这样避雷器的连接线可大大缩短。

**正变换过电压** 配电变压器低压侧的过电压会通过变压器高、低压绕组间的电磁耦合按变压器的变比变换到高压侧形成高压侧的过电压。这种低压侧受雷击直接变换到高压侧的过电压称为正变换过电压。由于配电变压器高压侧的绝缘裕度远较低压侧为低,常会出现变压器低压侧受雷击,低压侧绝缘未损坏,而高压侧绝缘因正变换过电压而损坏的现象。

由于低压侧受雷击时三相对地电压会同时升高,所以正变换过电压具有零序的特性。由于此时配电变压器的高压侧相当于经导线的波阻抗接地,因此正变换过电压将使变压器高压绕组的中性点附近出现过电压,危及中性点附近的主绝缘,也可能使纵绝缘击穿。

**反变换过电压** 配电变压器高压侧受雷击造成高压侧避雷器动作后,流经避雷器的雷电流 $I$ 在接地电阻 $R$ 上产生的压降 $IR$ 将作用在配电变压器低压侧的中性点上。由于低压侧出线此时相当于经导线的波阻抗接地,而低压绕组的阻抗远大于波阻抗, $IR$ 的绝大部分将都加在低压绕组上,引起三相低压绕组上电压的同时升高。低压绕组上的电压升高将通过高、低压绕组间的电磁耦合按比例变换回高压侧,形成高压侧的过电压。这种高压侧受雷击引起低压侧电压升高再反变换回高压侧的过电压,称为反变换过电压。

反变换过电压也具有零序的特性。由于此时变压器高压绕组出线端的电位已由避雷器固定(在避雷器未动作的相,相当于经导线的波阻抗接地),因此反变换过电压将使配电变压器高压绕组的中性点附近出现过电压,危及中性点附近的主绝缘,也可能使纵绝缘击穿。接在配电变压器低压侧相线和零线间的低压避雷器可以限制反变换过电压。

配电变压器低压侧避雷器的残压应按绝缘裕度低

的变压器高压侧的绝缘水平选择。当接在变压器低压侧的避雷器的残压不够低,以致换算到高压侧不足以保护变压器高压侧的绝缘时,出现在变压器高压侧的正变换过电压和反变换过电压就要靠高压侧的绝缘裕度来承受。

**Z形变压器** 在每年雷暴日数超过90的强雷区,为了增加配电变压器承受正、反变换过电压的能力,提高配电变压器的防雷可靠性,可采用高压绕组Z形接线的配电变压器。

Z形变压器的每相高压绕组由两个相差 $120^\circ$ 的匝数相同的绕组串联组成,图2是其绕组的位形图。由于正、反变

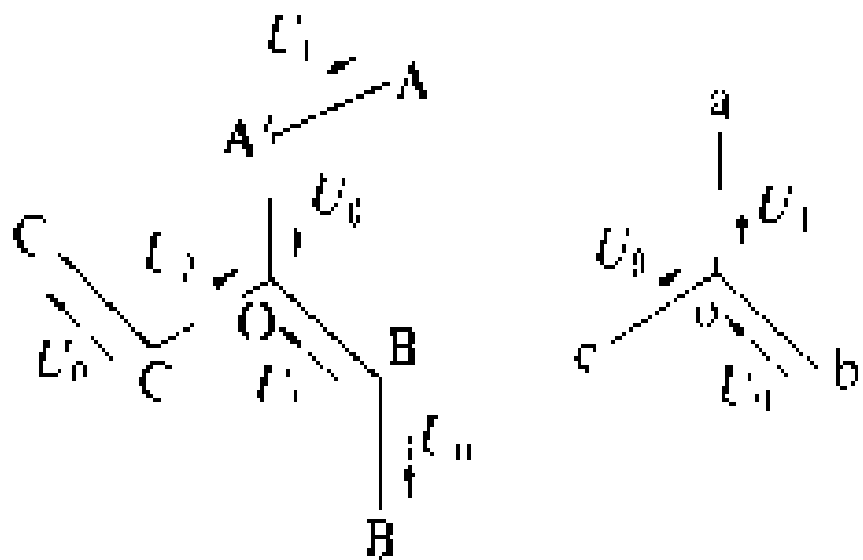


图2 Z形变压器的位形图

换过电压都是在变压器低压侧的三相绕组上出现零序冲击电压时产生的,高压绕组采用Z形接线后,当低压侧出现零序冲击电压 $U_0$ 时,在高压侧绕组每相中感应的总电压(单个绕组间的变比取为1)恰好为 $U_0-U_0=0$ 。因此,Z形接线的变压器可克服正、反变换过电压所引起的高压侧中性点电位的升高。Z形接线变压器的缺点是要多用16%的铜材。

参考书目

解广润. 电力系统过电压. 北京: 水利电力出版社, 1985

(陈慈莹)

peidianwang

**配电网** (electric power distribution system; power distribution network) 从输电网接受电能,再分配给各用户的电力网。以电力系统的多层次特点而言,各级电压的输电网是输电系统的一个层次;各级电压的配电网是配电系统的一个层次。以输配电设施的网络特点而言,中国习惯对配电系统也统称配电网;对输电系统也统称输电网。

配电网与输电网,原则上是按照其发展阶段的功能来划分的,而具体到一个电力系统中,则是按照其电压等级而确定的(见输配电和输配电电压等级)。中国的《城市电力网规划设计导则》规定:送(输)电电压为220 kV;配电网的电压等级分为三类,即高压配电电压(110、63、35 kV),中压配电电压(10 kV),低压配电电压(380/220 V)。世界上许多国家,仍依照传统习惯将10 kV及其相邻电压称为一次配电电压,将380/220 V及其相邻电压称为二次配电电压,而将110、63、35 kV等在发展历史中曾经起过输电作用的电压等级,称为次输电电压,但在性质上仍列入配电网。

压之类(见配电网电压等级)。也有些国家主张将电压等级明确划分为三类:输电电压、次输电电压与配电电压。中国的规定,则将次输电电压称为高压配电电压,以突出其配电性质。

**分类** 配电网按电压等级分,有高压配电网、中压配电网、低压配电网;按所在地域或服务对象分,有城市配电网和农村配电网;按配电线路型式分,有架空配电网和电缆配电网。

**功能和组成** 配电网的主要功能是从输电网接受电能,并逐级分配或就地消费,即将高压电能降低至方便运行又适合用户需要的各种电压,组成多层次的配电网,向各种用户供电。此多层次的配电网包括降压至 35 kV 或 110 kV 的变电所和 35~110 kV 的高压配电网,降压至 10 kV 的变电所和 10 kV 的中压配电网,降压至 380/220 V 的配电变电所和配电变压器及低压配电网。为了便于多层次配电网的运行和调度,还需配有必要的保护和控制设备。

不同电压等级的配电网之间通过变压器连接成一个整体配电系统。当系统中任何一个元件因检修或故障停运时,其所供负荷既可由同级电网中的其它元件供电,又可由上一级或下一级电网供电。

**基本要求** 对配电网的基本要求是供电的连续性、合格的电能质量和运行的经济性。

(1) 供电的连续性。要求停电的次数最少,而且每次停电所影响的用户尽可能减至最少。

(2) 合格的电能质量。主要是要求配电网的电压保持在规定的电压变动范围内。考核电压质量的指标包括供电电压允许偏差、电压允许波动值、三相电压允许不平衡度。还要求负荷的瞬时突变不致引起可厌的灯光闪烁,谐波含有量不超过当地电力管理部门的规定标准。(见配电网电压调整)

(3) 运行的经济性。配电网的各个电气元件在运行中要消耗电能,但须采用科学的管理方法和合理的运行方式,使电能损耗降至最低。

**城市配电与农村配电的特点** 城市配电的特点是:①负荷相对集中,负荷密度较高。城市配电网用电负荷的构成主要是工业、交通、运输、市政、生活用电。②用户对供用电质量要求较高。③配电网的设计标准较高,在安全与经济合理平衡下,要求供电有较高的安全可靠。④配电网接线较复杂,要保证调度上的灵活性,运行上的供电连续性及其经济性。⑤配电网的自动化较为完善,对电网管理水平的要求较高。⑥对配电设施的要求也较高。城市配电网的线路和变电所等设施须满足占地面积小、容量大、安全可靠、维护量小以及城市景观方面的要求,特别在城市中心区还需广泛使用地下电力电缆线路。城市配电网一般为三相三线式或

三相四线式配电。在低压配电网的末端,接至一般照明用户时,使用单相,一线一中性线。在大城市市区负荷密度大的地区常使用埋于地下的电缆线路配电,而在一般地区多采用架空线路配电。(见城市配电网)

**农村配电的特点**是:负荷分散,供电线路长,负荷密度小。中国农村用电负荷过去主要是农业排灌和农产品加工,近年来随着农村经济的发展,乡镇工业用电和农民生活用电也有很大增长,城乡用电差别逐渐缩小,特别是乡镇与县城的配电特点已向城市配电发展转化。由于中国规定县及县以下的配电网,属于农村配电网,因而需要区别对待乡镇县城的配电网与农村的配电网。(见农村配电网)

根据农村的用电负荷和地理特点,农村配电一般均用架空配电线。由于用电量小,配电设施不能充分利用,投资效益低,因此农村配电网在设计标准、设备选型等方面,宜多考虑降低投资和经济运行。

农村架空配电线路,一般采用放射型接线。随着农村用电负荷增长,变电所增加,主干线逐步形成二端供电、开环运行的单环网,中间多设分段断路器。线路故障时,可通过操作将故障影响范围缩小。干线和支线的断路器或保护熔丝广泛采用简单的一次自动重合装置,少数也有采用二次自动重合装置的,其供电可靠性一般也能为用户所接受。

偏僻地区的农村,地广人稀,往往几公里配电线路上仅有几个村落。世界各国对偏僻农村一般采用单相供电。因为架空配电线的导线截面,受机械强度的要求,不能太小,将三相负荷集中在单相上,可充分利用导线截面,节约投资。如北美国家农村配电的中压干线为三相四线,远离干线的村落用单相(相-中二线)供电。英国和爱尔兰的农村配电干线为三相三线,支线为单相(相-相二线)。澳大利亚在土壤电阻率低的地区,农村配电干线为三相三线,中性点接地,支线为单相(一线一地制),均取得了成功的运行经验。

农村配电网线路较长,在电压质量方面要特别注意,必要时可采取逐段调压,即逐段加装串接于线路的电压调整装置。线路末端故障时,短路容量可能小于保护熔丝的遮断容量下限,需在规划设计时予以考虑。

农村地处空旷,配电变压器易遭雷击而被损坏,故在多雷地区配电变压器除在高压侧装避雷器外,还应在低压侧加装避雷器。

**展望** 配电网的发展趋势表现在六个方面:

(1) 简化电压等级。这有利于配电网的管理和经济运行。世界各国都规定了电压等级和标准,并尽可能减少降压层次,将已存在的非标准电压逐步升压改造。同时随着负荷密度的不断增长,将输电电压(例如 220 kV)直接引入市区。法国巴黎的配电标准电压只有 225



kV、20 kV 和 0.4 kV 三种，收到很好的效果。

(2) 为了城市美观和安全，有些国家的大城市早已将城市配电网入地。绝缘导线或绝缘电缆的架空配电网也已逐步应用。

(3) 配电网接线进一步向简化和高可靠性方面发展。例如广泛采用线路变压器单元，以取消高压侧断路器，在线路故障时跳开送端断路器；馈线采用多回路并列运行或多回路闭式环网运行，以提高线路利用率和供电可靠性；开环运行的单环网加装馈线自动化装置（或称无压自投装置），以减少故障时用户停电时间，各国对此已有成熟经验，并正在逐步推广。低压格式网络在某些国家大城市中虽有数十年成功的运行经验，但由于投资高、运行复杂，近年来已受到一定限制。

(4) 为减少与城市建设的矛盾，减少线路走廊用地和配电装置占地，半地下变电所和地下变电所以及小型成套配电装置，将在配电网中进一步扩大使用。窄基铁塔、钢杆线路、多回路并架线路将继续采用。地下电缆建设日益增加，电缆隧道、电缆沟、预制排管、公用事业管道合用的共同沟与共同隧道等措施将进一步推广。

(5) 配电网自动化程度日益提高。由于计算机技术的迅速发展，促使自动化技术的应用已由变电所发展到配电线路，并使供电与用电两方面的业务紧密联系，从而使配电网的管理水平进入更高阶段。（见配电网计算机辅助管理）

(6) 设备的技术进步是输配电技术进步的重要关键，新型配电设备的开发，除适应配电网的技术要求外，还必须经济上恰当合理。为节省运行费用，维修少或不需维修的设备如 SF<sub>6</sub> 绝缘的全封闭配电装置和真空断路器等必将在城市配电网中推广应用，近年来 SF<sub>6</sub> 绝缘的组合电器已由超高压发展至中压 10 kV，价格也较合理。XLPE 电缆、架空绝缘导线和绝缘电缆，早已在各国广泛使用。据某些国家统计，虽然架空绝缘导线价格比裸导线要贵，但计及线路的故障损失后，最终仍以采用绝缘导线更有利。对配电网大量使用的设备，则向降低成本和简化结构方向发展，例如以较简单的变压器保护单元代替传统的环型供电装置，以中压多回路开关箱代替中压断路器等。架空配电线上大量使用而不大为人们所注意的跌落式熔断器，也不断地在改善其开断电流上下值范围和切断负荷电流的能力。

参考书目

Westinghouse Electric Co. Electric Utility Engineering Reference Book, Vol. 3: Distribution System, Pennsylvania: East Pittsburgh, 1959

（唐德光）

peidianwang dianneng sunhao

配电网电能损耗 (energy loss of distribution system)

配电网运行时供电线路和电气设备的电能损耗，简称配电网线损。一般包括配电网中的配电线路、电力变压器、并联或串联电容器、并联电抗器及同步调相机等的电能损耗。配电网电能损耗直接影响到配电网运行的经济性，降低配电网线损，是配电网运行的一项重要工作。

配电网线损和线损率的统计计算 配电网的线损可用统计或计算两种方法求得。统计线损可由配电网所辖范围的各供、售电量计量表统计得出，这种方法简便、实用，可迅速求得线损数值，但较难进行分项损耗的分析。理论线损（即计算线损）是用对配电网所属各供电设备，根据网络接线、潮流分布、设备参数等已知条件进行电能损耗计算得到的，其计算过程较为复杂，但通过对各元件电能损耗的计算，有利于分项损耗的分析。通常，可根据实际需要选择一种方法，也可同时使用两种方法，相互校正，以得到正确的结果。统计或计算线损时，应选定一个有代表性的配电网运行方式和潮流分布、绝大部分供电设备运行情况、绝大多数用户用电情况、气候情况均正常的典型运行日作为代表日，进行 24h 的负荷、电压等实测工作，并收集发电厂、变电所、配电网的运行接线图，变压器、线路、调相机、电容器、电抗器等供电元件的参数资料，作为统计或计算线损的依据。配电网的线损是各元件电能损耗的总和，各元件的电能损耗可按各元件的日负荷曲线用均方根电流法、平均电流法或最大电流法来计算。

配电网的损耗电量与供电量之比，称为电能损耗率，简称线损率，是配电网的综合经济指标，也是国家考核电力部门的一项重要经济指标。配电网线损管理和分析工作中，要对统计线损和理论线损按电压等级进行统计计算，分别列出变压器、线路及其它元件的损耗电量及其所占该电压等级的总损耗电量的百分数，并与上年（或与历年）的各级电压线损及分类线损进行比较，分析判断供电半径、电流密度、供电电压、潮流分布、变压器负载率以及售电的构成等方面对损耗结构变化的影响，从而提出切实有效的降低线损措施。

降低配电网线损的措施 通常采用的措施主要有：①选用低能耗的供电设备替换高能耗的陈旧设备；②调整配电网接线和运行方式，合理分配网络的有功、无功潮流；③合理调整运行电压，在配电网铜损与铁损之比大于 1 时，可提高电压水平，而小于 1 时，则降低电压水平；④在用电负荷增长或简化电压等级淘汰非标准电压时，提高配电电压等级；⑤选择配电网的某些节点装设适当容量的无功补偿设备，减小电源点与这些节点间串接元件的无功潮流；⑥增加电源至受电点

间线路并列运行的条数;⑦减少线路迂回,缩短供电距离或增大线路导线截面;⑧通过计算确定环网的开环点,使开环运行后的网络功率分布接近经济功率分布;⑨根据变电所负荷,按变压器经济运行的要求来选择变压器并列运行台数及其组合方式。

(金辅夏)

perdianwang dianya dengji

**配电网电压等级** (voltage levels of distribution system) 根据国家电压标准,并结合电力系统的输电电压以及所在供电地区的配电条件,所选取的各级配电网的电压。配电网电压等级既决定了供电设备所需的绝缘水平,又直接影响到电能损耗和电压损失。对不同性质、不同容量、不同供电距离的电力用户,采用不同的电压等级供电,可获得必要的供电可靠性和较好的经济性,并有利于保证合格的供电电压质量。因此,配电网通常采用几个标准电压等级建设并运行。

中国配电网电压等级分为高压配电电压(110、63、35 kV),中压配电电压(10 kV)和低压配电电压(380/220 V)。其中高压配电电压有的国家也称次输电电压,中压配电电压也称一次配电电压,低压配电电压也称二次配电电压。

**电压等级的正确选择** 总的原则是技术上先进可行,运行上经济合理。具体考虑以下四个方面:①尽量减少配电网的电能损耗,做到经济合理;②与配电网的改造工作相结合,要便于整个配电网的发展,保证配电网的运行灵活与安全可靠;③要以发展的观点确定适当的电压等级,以适应配电网负荷密度的增长趋势,并防止日后改进工程上的浪费;④设备供应与制造技术上的协调性和可行性。

由于供电发展过程中的种种原因,有些国家或地区形成过多的非标准的供电电压等级的局面,造成:①电压管理复杂,影响供电质量;②联网运行、统一调度困难,配电网运行的安全性与可靠性降低;③增加了配电网电能损耗,降低了运行的经济性;④设备品种和规格过多,难以实现产品标准化和规格化,阻碍了设备制造技术水平的发展,影响了产品质量和经济效益的提高。消除这些弊端的主要措施是在正确选择供电电压等级的基础上,制订供电电压等级的国家标准,结合配电网的发展和改造,淘汰非标准供电电压,并进而简化电压等级,减少变压层次。

**电压等级的标准化** 在正确选择供电电压等级的基础上,世界上大多数国家都已制订了适合本国国情的国家供电电压标准,作为逐步统一本国供电电压的依据。如美国、日本、联邦德国等分别将十多个电压等

级定为国家供电电压标准。中国按照《全国供用电规则》规定,供电额定电压为500、330、220、110、35(63)、10、0.38、0.22 kV,并规定除发电厂直配电压可采用3 kV、6 kV外,其他等级的电压应逐步过渡到上列额定电压。对于需要过渡的电压等级,大多数国家都采用向高一级电压等级过渡的原则。

**发展简况** 在实施供电电压标准化的过程中,为进一步降低电能损耗,促进电力设备的标准化和规格化,减少备品数量以及便于运行检修管理,有必要进一步简化电压等级、减少变压层次。各国配电网设置电压等级的发展趋势是:大城市采用四级电压供电,一般城市则采用三级电压供电。如英国伦敦20世纪70年代初的电压等级有:275/132/66/11/0.415 kV、275/132/33/0.415 kV、275/132/22/0.415 kV、275/132/66/33/0.415 kV以及275/66/22/0.415 kV等各种组合,实行分区供电,计划要求逐步取消22 kV,变成275/132或66或33/11/0.415 kV。法国计划取消150、90、63、5 kV电压等级,主要采用380/225/20/0.38 kV。联邦德国则主要采用380/110/20或10/0.4 kV。日本东京原有电压等级为500/275/154/66/30(20)/6/0.2(0.1) kV,已决定把66 kV以下改为66/20/0.4 kV。中国自1981年开展城市配电网规划改造以来,电压等级已初步归纳为220/110(63、35)/10/0.38 kV,对一个地区或一个城市的部分地区220 kV与10 kV之间只选择一级电压,以减少变压层次。中国西北330 kV地区的电压等级可能发展为330/220(110)/10/0.38 kV,而上海、北京、天津、广州等大城市外围已出现500 kV电压等级,500 kV外环形成后,整个电压等级增加一级,是否要在220 kV与10 kV之间再行简化,要看将来的负荷发展情况而定。

见输配电电压等级。

(金辅夏)

perdianwang dianya tiaozheng

**配电网电压调整** (voltage regulation of distribution system) 将配电网的电压调节到允许偏移值之内的措施,简称电压调整。配电网运行时,因网内元件的阻抗通过负荷电流时产生电压降(或电压损失),它和电源电压变化值的和导致了配电网各点的实际运行电压与额定电压产生偏移,称为电压偏差,通常用额定电压的百分数表示。电压偏差超过允许值时,应采取增减无功功率、改变无功潮流和改变配电网参数等方法进行调整。

**电压偏差标准** 中国国家标准GB12325《电能质量 供电电压允许偏差》中规定了供电电压变动幅度允许值为:35kV及以上供电电压正、负偏差的绝对值

之和不超过额定电压的 10%；10 kV 及以下高压供电和低压三相供电电压的偏差允许值为额定电压的 ±7%；低压单相供电电压的偏差允许值为额定电压的 +7%、-10%。世界其它各国都规定了各自的电压允许偏差标准。凡结构合理、运行水平较高的配电网，其电压允许偏差值都定得较小，从而使用电设备能经济、安全地运行。

**电压调整措施** 为使各用户端的电压符合电压允许偏差标准的要求，各级电压的配电网均需要采取相应措施进行电压调整。

**增减无功功率** 调整发电机的无功出力进行电压调整的措施，它只需调节发电机的励磁电流，无需增加任何费用和设备，是最简便易行的方法。但其适用范围有很大的局限性，特别是在供电范围较广的多级电压配电网中，由于线路压降大，负荷变化幅度大，单靠发电机进行“中心调压”往往不能满足配电网中各节点对电压调整的要求，所以还必须在适当的节点加装并联调相机和投切并联电容器或并联电抗器，以增减无功功率，达到电压调整的目的。

**改变无功潮流** 通过调整变压器的分接头，以调整其二次侧的电压，达到电压调整的目的。变压器的分接头调节方式，因构造和性能不同，分为固定调节的和带负荷调节的两种。固定调节是不带负荷调节的，只能起调节电压水平的作用，即依靠调换固定分接头，使得在任何负荷下相应提高或降低的电压百分数几乎相同，不能缩小最大负荷与最小负荷之间的电压变动幅度，也就不能适应经常调整电压的需要。带负荷调节是采用有载调压变压器，可以随时调换分接头，达到经常调整电压的目的。分接头的调节，可以人工控制，也可自动控制，若加上以综合反映线路负荷及其产生的压降为原理的线路压降补偿器，则可进行逆调压。对新装设的变压器，要根据调压要求，考虑装设有载调压变压器。对运行中的带固定分接头的变压器，在需要有调压要求而因某些原因不宜调换为有载调压变压器时，可加装串联调压变压器。另外，感应型调压器也是一种自动调压设备，属无级调压方式，适用于电压要求较高的场合，但需较大的励磁无功功率，设备造价又较高，故从经济性考虑，其通过容量一般不宜超过 750 kV·A，电压不宜高于 10kV，往往用于变电所的中压侧，作城市中压配电网主干线调压之用，很少用于地区电网。（见变压器调压装置）

**改变配电网参数** 比较简便而实用的措施是根据负荷大小改变并列运行的变压器台数。当负荷较小时，切除一部分并列运行的变压器，不但能减小变压器损耗，而且使变电所二次侧母线电压降低。当负荷较大时，再把一部分变压器投入并列运行，使变电所二次侧

母线电压提高。这对调压要求是有利的。同样，可以按负荷大小接入或切断一部分并列运行的线路来实现调压，但往往要增加线路损耗，降低运行可靠性，故这一调压措施只有在特殊情况下才采用。采用串联电容补偿是改变配电网参数实现调压的一个重要方法。串联电容的容抗补偿了一部分线路电抗，减少了因线路电抗造成的电压损失，其减少量的计算公式为  $\Delta(\Delta U) = QX_c/U$ ，式中  $\Delta(\Delta U)$  为电压损失减少量，V； $Q$  为线路通过的无功功率，kvar； $X_c$  为串联电容的容抗，Ω； $U$  为额定电压，kV。由此式可看出，当线路中功率因数越低，其调压效果越显著，且线路电压损失减少量  $\Delta(\Delta U)$  与负荷的涨落成正比，故能缩小电压变化的幅度。串联电容调压不需通过机械部件的动作，可避免发生时滞现象，具有瞬时自动调压的能力，故对功率因数较低而负荷变化非常急剧频繁的长线路，是较为有效的调压方法。

配电网只有从整体出发，采取有效的综合调压措施，如各级串接和并接的调压设备恰当地配合运用，低压单相供电改为三相四线制供电并平衡每相负荷等，才能获得较好的改善电压的效果。同时，在调压效果相同时，要选择节能效果好的调压措施。

见输配电网的无功补偿与电压调整。  
(金辅夏)

peidianwang diaodusuo  
**配电网调度所** (dispatching center of distribution system) 配电网运行的监视、控制、指挥机构。其职能包括执行电力分配、电能质量监视、电力设备运行状况监视、配电网运行方式变更以及配电网不正常运行状态处理等。配电网调度所全天 24 小时有调度人员值班，按照规定的标准和程序执行各种任务，对配电网的正常运行和异常情况处理负有直接责任，并享有指挥权力。在业务上受上一级电网调度所的领导，接受其调度命令。在行政关系上是管辖该配电网的电力管理部门的一个职能机构，受上级行政部门的领导。

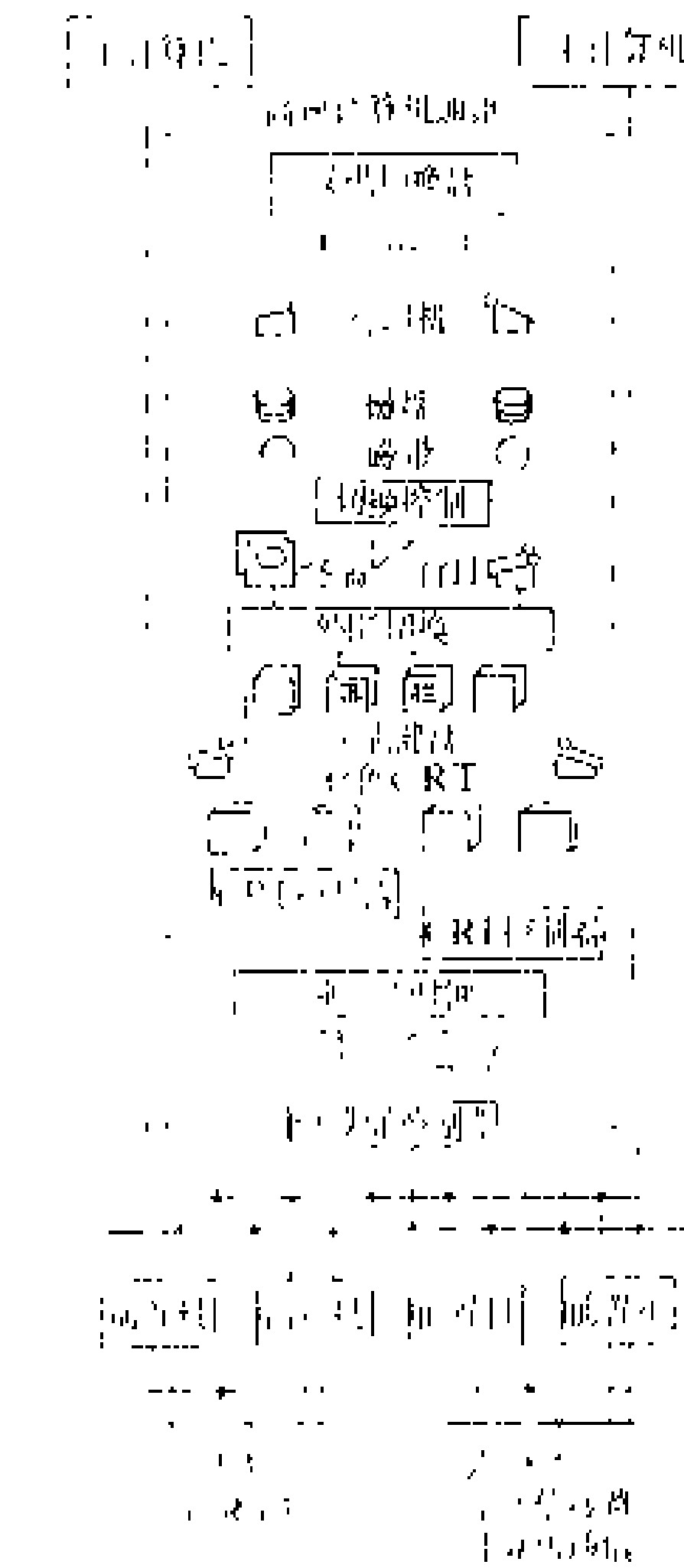
配电网的调度管理可以分为几个级别，决定于电压等级和配电网结构层次，每级又可设立几个调度所，决定于电网规模及行政管理区域的划分。分级和分区的调度所名称，各电力系统的称谓和习惯尚不统一，例如某些城市配电网规模较大时，可以设立几个地区调度所（简称地调），每个地调下又可分设几个区域调度所（简称区调）。地调负责所辖地区内较高电压等级的配电网的调度，并在业务上直接领导下设的区调。区调则负责所辖小区内的较低电压等级的配电网的调度。整个配电网内按地区设立两个及以上地调的，则再上

一级尚须有省、市一级调度统一指挥。各级调度的调度范围、职责和相互关系，在调度规程中明确规定。

**调度所职能和组织** 配电网各级调度所的基本职能是做好所辖配电网的调度运行工作（见配电网调度运行）。为此，一般调度所下设调度、运行方式、继电保护、远动通信、操作急修等组织，以及停电通知员、电话承询员等，其中值班调度员、操作急修班和电话承询员，为三班制，其他为常日班。调度所中所设班组需根据需要确定，例如：负责高压配电网调度的地调，配电网上的直接供电用户很少，系统操作由变电所值班人员和属下区调执行，可以不设操作急修班、停电通知员和电话承询员等编制。至于远动通信设备的维护和管理，若已有专业机构负责，则亦可不列入调度所业务范围之内。

**调度所装备** 调度所的调度室一般设置调度台、电网模拟图板、通信工具及录音机、标准钟、数字式频率表、电压表等技术装备。调度台为值班调度人员的工作台，每人一台，配以通信工具和录音机等设备。调度模拟图板位于调度台前方，是带有各种符号的全电网单线接线图。调度模拟图板的尺寸及设置，要使调度人员在工作台上工作时能清楚地看到其细节。图板上各种电气设备的连接及其运行状态与配电网实际运行状态完全吻合一致，以供调度员随时查用。配电网接线或

设备变动时，应及时在图板上修正。设备运行状态改变时，应立即在模拟图板上更改，实现调度自动化后，这种更改可自动实现。通信工具对调度工作非常重要，除主要通信系统外，尚须有备用通信和专用通信系统。主要通信系统最好是电力工业单位内的自有内线通信系统，电话局的电话通道可作为备用。农村地区无内线通信的，只能用电话局的电话作主要通信，用无线电通信作备用。外线操作与调度所间一般用无线电通信。



典型的配电网调度自动化系统配置图

专用通信指各调度所间或调度所与重要变电所间的专用对讲电话。具备上述装备后，才能进行调度工作，但

一切靠通信联系，速度慢，效率低。

近年来，发展了一种用计算机及远动装置进行电网监控和数据收集的系統，称为调度自动化，为调度员增添了灵敏的耳目，更好地加强了配电网运行管理工作和加快了事故处理速度。如图所示为典型的调度自动化系统配置，它包括收集信息的远动装置，数据处理的计算机及其外围设备如屏幕显示、打印机、外存以及表示实时运行状态的电网模拟图板等。调度台上配备有人机对话的操作键盘。整个系统由两路交流电源供电，并备有不停电电源装置。

**展望** 随着调度所自动化水平的提高，调度手段将更趋完善、便利。例如：调度控制台上配置通信键盘和远动计算机系统的操作键盘，输入调度命令，人工置数，产生显示终端新画面，复制所指定的画面，随机打印运行参数等。采用屏幕显示器（CRT），显示发电厂和变电所的单线系统图、遥测和遥信的有关信息、计算机计算结果的表格等。此外，在调度模拟图板上除显示断路器位置和事故信息外，还采用动态显示配电网实时数据，以达到直接监视的效果，帮助调度员更好地对配电网运行加强管理和进行事故处理。

（许云汉）

peidianwang diaodu yunxing

**配电网调度运行** (dispatching operation of distribution system)

为了维持配电网正常运行，由调度所负责和指挥的电网运行工作。主要包括：①配电网运行情况的实时监控。指随时掌握所辖配电网的功率总和、电能质量、事故和越限报警情况，并作出相应反应，对一些重要的运行参数进行定时记录。②安排和实现配电网的最佳运行方式。指按照配电网安全经济运行要求、检修停运需要等情况，安排配电网运行方式，并指挥操作人员具体实施。③安排设备停止运行和恢复运行。④新设备起运投运。⑤电力系统操作管理。指为改变配电网运行方式所需进行系统操作的一套程序和管理工作，例如按分工发布操作命令或审批操作票，指挥操作人员按程序正确执行操作步骤等。配电网操作管理是调度所的主要日常工作。⑥配电网事故处理。指对设备故障造成开关设备跳闸并已停电的事故进行故障隔离、恢复供电的工作。异常情况一般是设备过负荷发热、绝缘损坏但未造成跳闸，电压监视点的电压偏离了规定值等不正常情况。对事故和异常情况的处理，要求果断、快速，这是调度运行中的一项重要工作，处理好坏是对调度水平的严格考验。⑦继电保护管理。指对新设计的配电网或原有配电网改造时以及现有继电保护装置改进时，提出或审核继电保护原理图，并提出继电保护整定值的计算书，交基层继电保

护人员现场执行，以保证配电网的正常运行。

配电网调度运行是一件实时性的运行工作，发生错误会影响配电网的安全。因此，电力管理部门一般都制订必要的规程制度，如调度操作规程、操作票制度、操作监护制度、事故处理规程及设备运行限额规定等，由有关人员严格执行。

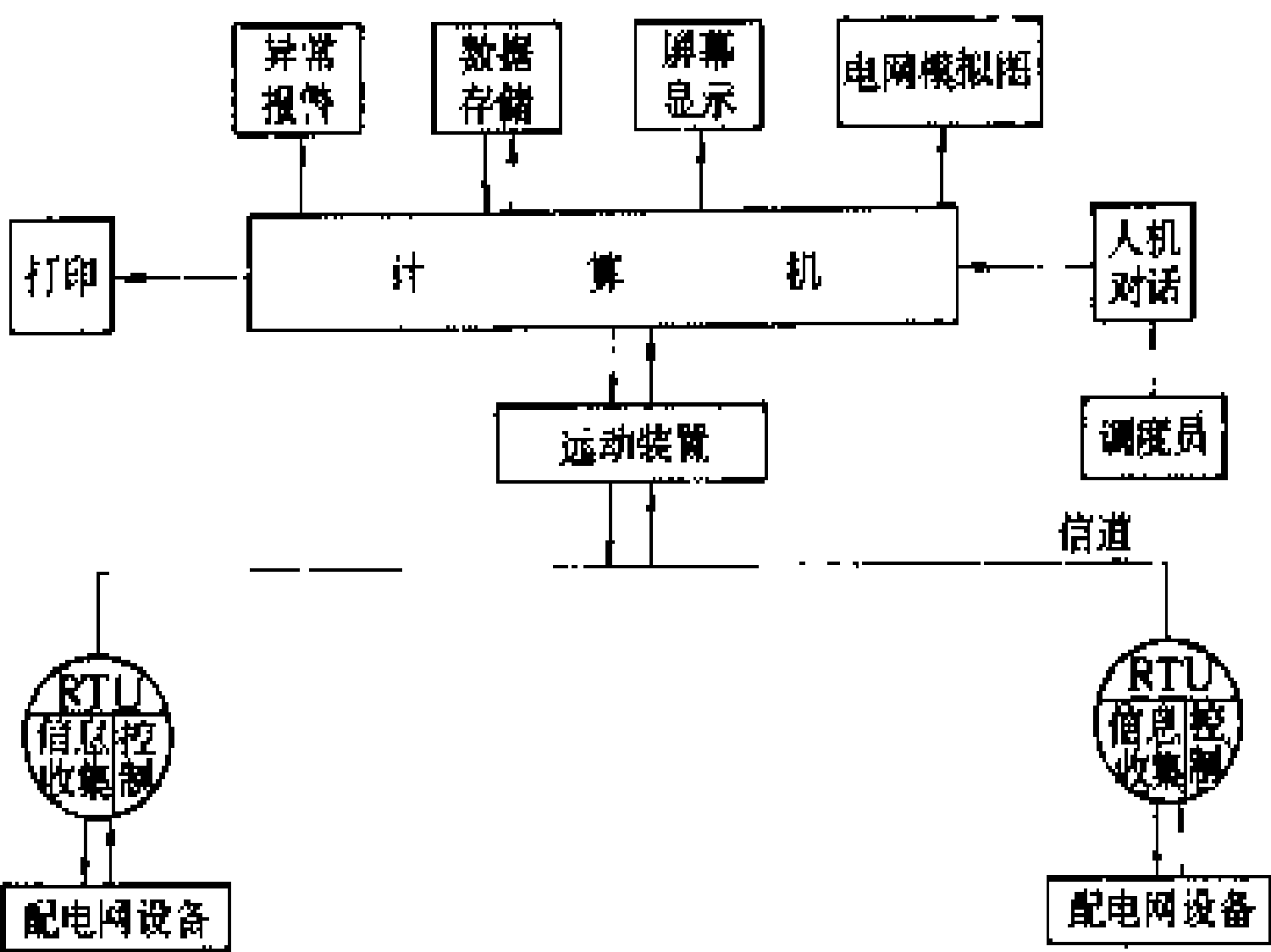
见配电网调度所、配电网调度自动化。

(许云汉)

peidianwang diaodu zidonghua

**配电网调度自动化** (dispatching automation in distribution system)

由中央处理机(计算机)和远动装置等组成的配电网监控和数据收集系统，以辅助调度员做好配电网运行工作的调度方法。做好调度运行工作，首先要收集可靠的实时数据(如有关的电压、电流、开关设备位置、事故或越限信息等)，以便调度员进行判断、采取行动。配电网的运行方式比较简单，配电网调度自动化的功能一般只有电网监控和电网数据收集，即所谓 SCADA 系统 (supervisory control and data acquisition)。该系统主要由变电所端的信息收集兼控制单元(RTU)、数据传输通道、调度端的远动装置、中央处理机、输出显示打印和人机对话等设备组成。如图所示为调度自动化系统框图。



调度自动化系统框图

**配电网远动装置** 由调度端主机、变电所端主机(RTU)及信道三部分组成。电气设备的运行参数和运行状态由变电所端主机采集后，转换成便于传输的远动信息，经信道送至调度中心，在调度端予以显示。调度人员要改变配电网的运行方式时，可发布操作命令，由调度端主机将命令传送至变电所端主机执行，断开或合上相应的断路器，实现安全经济运行。组成远动装置的主要元器件曾先后采用继电器、晶体管、中小型集成电路等构成，已逐渐被微机远动所取代。

根据配电网的具体情况，SCADA 系统可以采用两遥(遥信和遥测)、三遥(遥信、遥测和遥控)或四

遥(遥信、遥测、遥控和遥调)远动装置。目前两遥、三遥装置的应用已比较普遍，四遥远动装置虽具有遥调功能，可用以调节电力变压器分接头和同步调相机励磁等，但采用较少。

微机远动是利用电子计算机来控制远动装置的运转，由运行管理程序以指令形式指挥各个功能块进行工作。它的主要特点是体积小，信息量大，可靠性高，易于与屏幕显示、打印机等配套使用。

**配电网信息传输** 配电网远动信息传输的信道有四种：电力部门的电力线载波信道、租用有线信道(例如租用电话线、电视电缆网线路)、无线电系统信道(例如微波、特高频或甚高频信道)、敷设专用信道(例如敷设电话通道或光缆信道等)。四种信道实质上分为有线信道(实线、载波)和无线信道两大类。目前配电网调度通信中主要采用有线信道，尤其是实线信道更为普遍。远动信息的传输方式有循环传送方式和问答式两种。循环传送方式是以变电所端为主体，信息按照连续时间分配的工作方式传送到调度中心。问答式是以调度中心为主体，由值班调度人员选择收集信息，其优点是使用灵活，网络可用链式结构，信道利用率高。

**配电网遥控** 在远离电气设备现场，采用电信号对该设备进行控制操作的方法。电气设备必须具有电气传动的隔离机构，才能进行遥控操作。遥控操作时一般先选定遥控对象，经确认后再进行分、合闸操作。操作命令由调度中心发送，变电所端收到操作命令后使相应的继电器动作，接通遥控对象的分、合闸回路。目前采用电码连送、返送校核、遥信优先、数量保护、双重命令保护等措施，以提高操作的可靠性。

音频脉动控制装置是一种仅有遥控单一功能的装置，它的控制对象大多是用户处的断路器，按用电性质进行分类控制。采用音频脉动控制装置，对电力供应比较紧张的地区，可以起到调节负荷的作用。它所采用的音频信号频率，如 184/3、167 Hz 等，具有防工频谐波干扰的性能，并且其操作是一次完成的。由于信号传送速度较慢，控制对象对系统运行影响不大，因此较少采用信息防干扰措施。

**配电网遥信** 配电网断路器的运行状态(断开或闭合)、保护继电器的动作情况以及运行中各种异常情况，通过远动装置发送至调度中心，以便调度人员进行监视的方法。配电网的信号系统一般分为位置信号(断路器触头及变压器分接头)、继电保护信号及异常状态信号三个类型。变电所端将所有信号进行分组编排，每个信号占用码字的一个码元。信号的两种状态，如断路器的断、合，继电器的动作、释放，以相应码元产生“1”或“0”来表示。遥信信息码传送到调度中心后，在显示系统中显示出来。在问答式信息传输中，平



时不发送遥信信号,仅在状态发生变化时,才向调度中心发送信号。为了校核变电所端的信号系统情况,调度中心可以采用查询方式强迫起动遥信发送。

**配电网遥测** 配电网中预定点的运行参数,采用电信号的方式在调度中心进行测量的方法。目前配电网中可进行遥测的运行参数有电压、电流、有功功率、无功功率、电度、频率、相角及温度等。无论是电量参数或非电量参数,都必须采用变送器将其变换成某一数值的直流电压或电流,然后经模/数转换变成与参数值成比例的二进制数码,经调制后送往调度中心。调度中心将收到的电码经解调后还原成二进制数码,在荧光数码管上显示出来。为使显示值与现场参数相一致,一般应乘以标度变换的系数。用二进制数码表示的遥测量,一般有两种表示方法:一种为纯二进制,即用二进制数码值来表示遥测量;另一种为二-十进制,即用数码中每四个码元来表示遥测量的某一位值。在数据信息传输中,每个码字表示一个遥测量,循环传送,周而复始,调度中心可以根据需要进行连续显示或选择显示。

**展望** 传统的配电网调度自动化系统中,三遥功能只局限于高、中压变电所及其上一级网络中,而对广大中压配电网的监控尚须由人工进行。近年来,随着各国对配电网运行技术的不断发展,自动化范围已扩向中压配电网。首先将线路上开关设备赋予遥控和就地自动操作功能,线路故障自动显示系统利用原有电力电缆作信道在变电所或调度所显示电缆故障位置,再由控制端计算机根据预编程序自动进行故障段线路隔离、完好段线路恢复供电的操作,大大提高了供电可靠性。一些国家如美、日、英、法、德等国的一部分电力企业,已在调度部门实现了配电网调度自动化,并正与科研部门、学校合作研究将人工智能和专家系统引入自动化系统,减少自动化中的人机对话人工干预,在开发操作票和不正常情况处理方面的应用,也已取得了一定成果。

**参考书目**

盛寿麟,尹更生.电力系统远动原理及应用.北京:电力工业出版社,1980  
王新梅.纠错码浅说.北京:人民邮电出版社,1976

(牟宝荣)

peidianwang fuhe midu

**配电网负荷密度** (load density of distribution system) 一定供电地区内,最高负荷时,配电网线路的回路长度或供电区域占地面积内的平均单位负荷值。即负荷密度  $D_L = \frac{P(\text{供电负荷})}{L(\text{配电网线路回路长度})}$

或  $D_s = \frac{P(\text{供电负荷})}{S(\text{供电区域占地面积})}$ ,它分别以 kW/km、kW/km<sup>2</sup> 或 kV·A/km、kV·A/km<sup>2</sup> 单位表示,但供电负荷以视在功率(单位为 kV·A)表示更能说明其发热效应,其中  $D_L$  适用于架空配电网。提出负荷密度时,最好一并说明参与计算的全部负荷和全部面积,以体现其密度的特性。对个别负荷特别集中的高层建筑,占地面积小,建筑面积大,负荷高,则可用局部负荷密度来表示。工厂地区的负荷密度,无实际意义,因为各个工厂的性质不同,负荷有很大差别,故一般都以集中点负荷来表示。

城市负荷密度随着城市建设发展和经济繁荣增长极快。20 世纪 80 年代初期,英国伦敦 665 km<sup>2</sup> 市区的平均负荷密度为 5.7 MW/km<sup>2</sup>;中国北京 150 km<sup>2</sup> 市区的负荷为 850 MW,平均负荷密度为 5.66 MW/km<sup>2</sup>,上海 149 km<sup>2</sup> 市区的平均负荷密度为 6.7 MW/km<sup>2</sup>;日本东京 572 km<sup>2</sup> 市区的平均负荷密度为 15 MW/km<sup>2</sup>。至于局部的负荷密度则更高,例如 80 年代末期,上海市黄浦区 2.2 km<sup>2</sup> 的商业区负荷密度为 15 MW/km<sup>2</sup>,东京银座 25 km<sup>2</sup> 商业区的负荷密度为 140 MW/km<sup>2</sup>,而新宿 0.57 km<sup>2</sup> 的商业中心的负荷密度更高达 402 MW/km<sup>2</sup>。

配电网负荷除极少数为集中负荷外,其主要特征是分散负荷,均匀或不均匀地分布在电力网沿线或供电地区内。但在计算配电网负荷密度时,实用上对配电网的负荷都可作均匀分布来处理,其中以配电网单位回路长度表示的负荷密度,可用于配电线路的电压降及线损等计算,而以面积表示的负荷密度,可用于配电变电所位置和容量的选择。在一个供电地区内,若负荷均匀分布且架空配电网的布置已知时,上述两种不同单位的负荷密度值可以相互变换。

(金辅夏)

peidianwang fuhe quxian

**配电网负荷曲线** (load curve of distribution system) 配电网负荷与时间的关系曲线。它反映了一定时间段内负荷随时间变化的情况。通过配电网负荷曲线,可以掌握各个时期内负荷变化的规律,从而制订出配电网设备运行、维护、检修的计划,也可估计出配电网中设备及其负载的变化趋势,从而制订配电网的建设规划。

**分类** 配电网负荷曲线通常采用平面直角坐标绘制,纵坐标表示负荷值,横坐标表示对应的时间。纵坐标以有功功率负荷值表示的称有功负荷曲线,纵坐标以无功功率负荷值表示的称无功负荷曲线。根据横坐标延续时间,分为日负荷曲线和年负荷曲线。日负荷曲

线表示一日 24h 内负荷变化的情况,作为经济而合理地安排配电网日运行方式的依据,保证供电的安全可靠性;年负荷曲线则表示一年中的负荷变化情况,用以制订全年或各季的配电网运行方式,安排设备维修计划和实施配电网的年度改造、建设计划。

绘制方法 日负荷曲线可根据在一定时间间隔内功率的测量记录,在直角坐标中逐点画出,并依次连接成折线或绘成曲线,如图 1 所示。绘制日负荷曲线所选的时间间隔可自定,如半小时或一小时,时间间隔越短,越能精确反映

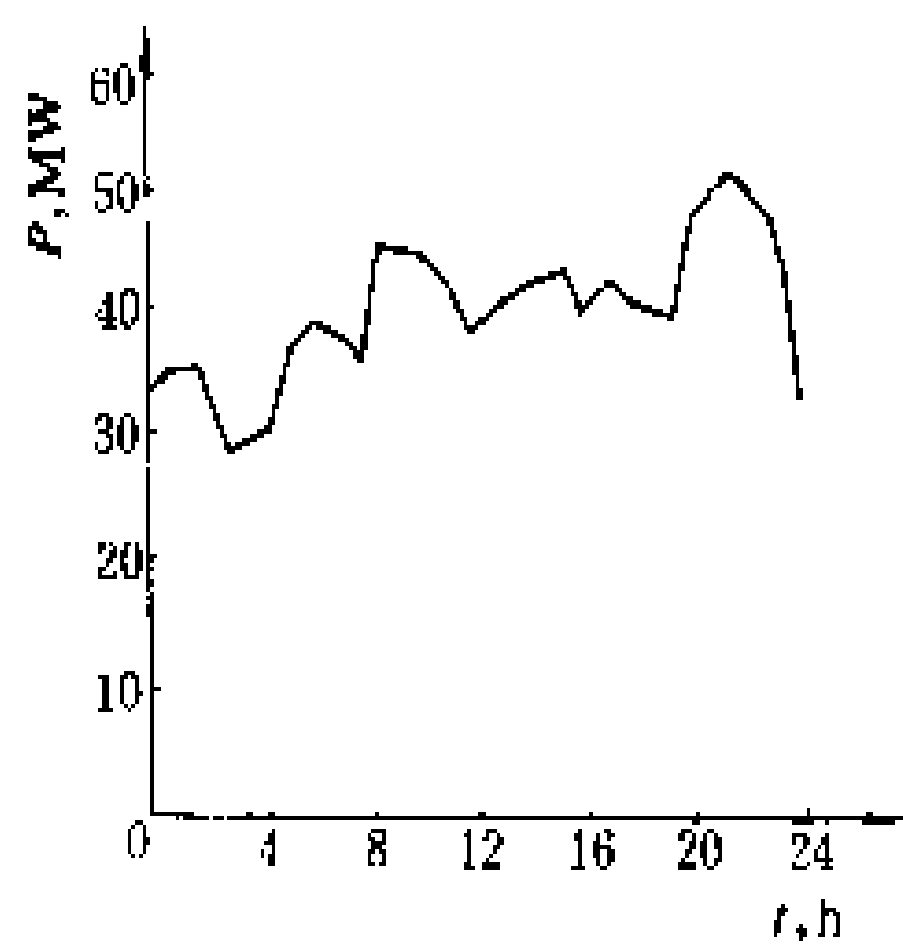


图 1 日负荷曲线

实际负荷的变化。为适于实际应用及便于计算,也可将所测量的各点数值逐点绘成阶梯形曲线。日负荷曲线

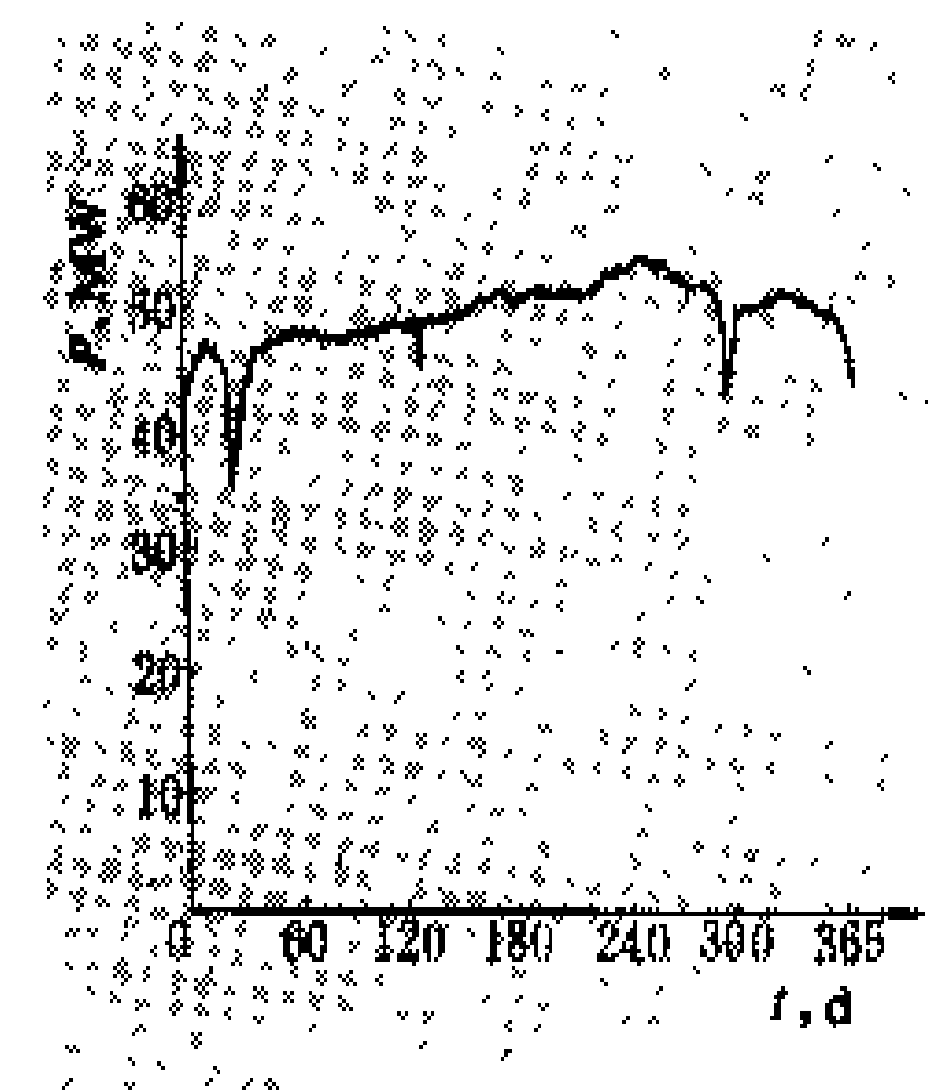


图 2 运行年负荷曲线

与纵、横坐标所包围的面积,就代表一天 24 h 内所消耗的电能,即配电网的日电量。年负荷曲线有两种,一种是表示一年中每日最大负荷变动的情况的,称为日最大负荷年变动曲线,或称运行年负荷曲线,如图 2 所示,可根据典型日负荷曲线间接绘制;另一种是不分日月的界限,而以全年实际使用小时为横坐标,以负荷大小的数值为纵坐标,依次排列绘制而成的,称为电力负荷年持续曲线,或称全年时间负荷曲线,如图 3 所示,这种负荷曲线可以近似地根据一年中具有代表性的夏季和冬季日负荷曲线进行绘制。全年时间负荷曲线与纵、横坐标所包围的面积等于一年内所消耗的电能,即配电网的年电量。

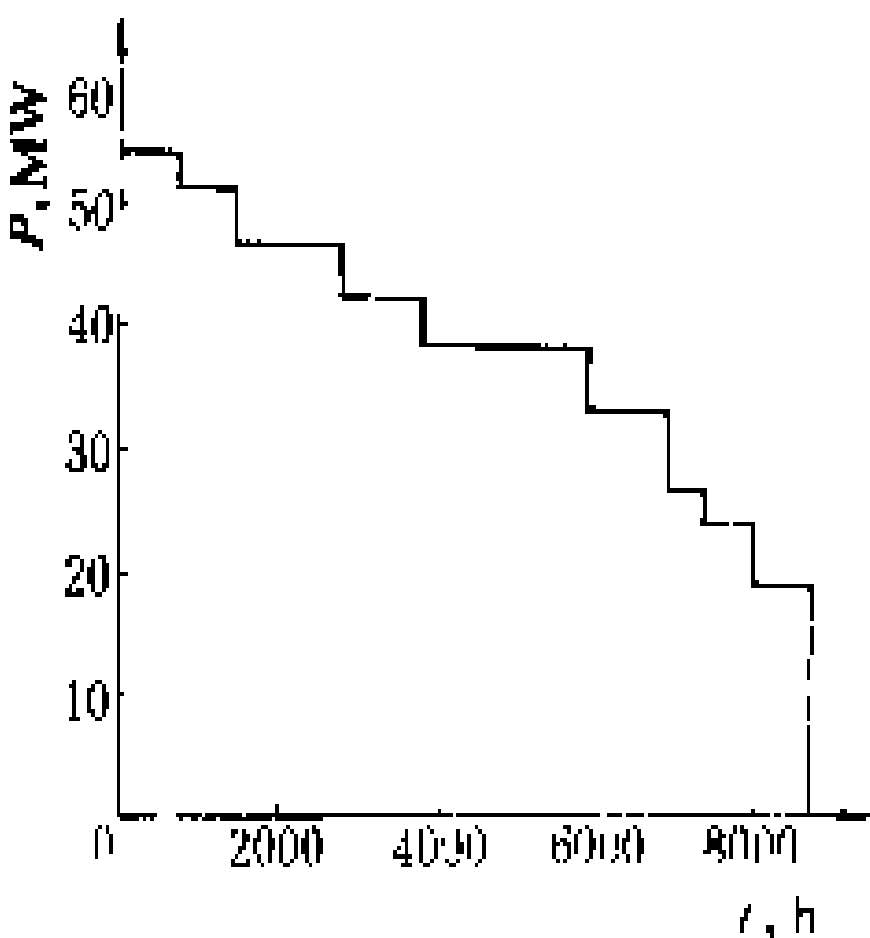


图 3 全年时间负荷曲线

应用和发展 用手工绘制负荷曲线,工作量较大,面在实际工程中,通常只需正确反映负荷曲线上某些

特定点(如最大点及最小点)的负荷值和曲线的波动程度,即可保证工程中所要求的足够精度。一般不直接绘制负荷曲线,而是应用典型负荷曲线特征参数进行理论推算,如应用负荷率、最大负荷利用小时数、需要系数、利用系数、最大系数等来推算负荷曲线中的最大负荷、平均负荷、日电量和年电量等。近年来,应用电子计算机进行辅助设计,可输入各类负荷的抄见用电度数,按该类负荷的典型曲线样板,由计算机绘成负荷曲线。若输入预测电量,则可由计算机绘出未来的负荷曲线,也可根据现在的实际负荷曲线,结合其历史增长趋势,得出未来负荷曲线。将直配线或配电网所有各类负荷曲线相加,就可得出该直配线及配电网的负荷曲线,这种方法可用于配电网的规划设计。

(金辅夏)

peidianwang fuhe texing

### 配电网负荷特性 (load characteristics of distribution system)

配电网负荷的固有性质和变化规律,如幅值大小、功率因数、波动情况、季节变化、集中程度、环境影响等。研究并掌握配电网负荷特性,有利于正确选择配电网接线,合理配置设备容量和型式,安排适当的运行方式,不断提高配电网的经济效益和供电的安全可靠性。配电网负荷是由各种不同类型的负荷组成。配电网负荷特性直接与各类负荷特性及其所占比重有关,它是各类负荷特性的总体反映。配电网的负荷特性可以通过现场测量得出,但由于配电网负荷的数量很大,都从现场测量不切实际,因此可以将负荷归类,通过较少负荷的现场实测,再用统计方法推论估计,得出各种类型负荷的特性轮廓和足够准确的数值,用于需要解决的配电问题。

各类负荷的特性 负荷的类别可按用户性质分类,也可按环境和地理位置、对配电网或其它用户所产生的影响、负荷的重要性和特殊性等因素分类。通常以用户性质属于国民经济中的门类,分为工业用电负荷、农业用电负荷、交通运输用电负荷、市政生活及照明用电负荷四类。

工业用电负荷 通常有负荷集中、连续性强的特性。负荷情况与行业性质及用户的工作方式有关,图 1 为不同班制企业的日负荷曲线。工业用电负荷虽然也随一些外界环境条件变化而有所增减,如部分建材、制糖生产受季节影响,采暖、通风、降温受气温影响,化工设备检修日期受产品单耗影响,冶金停炉检修计划受高温影响等,但负荷本身影响较小,全年负荷比较稳定。工业用电负荷在配电网负荷中的比重各国有所不同,工业发达国家的工业用电负荷比重较小(如美国、英国只占 1/3 左右,日本、法国、意大利占 1/2 左右),

而发展中国家的工业用电负荷比重却较大，一般都在70%以上。中国目前工业用电负荷占总负荷的70%左右，随着中国经济的发展，工业用电负荷比重有减小的趋势。

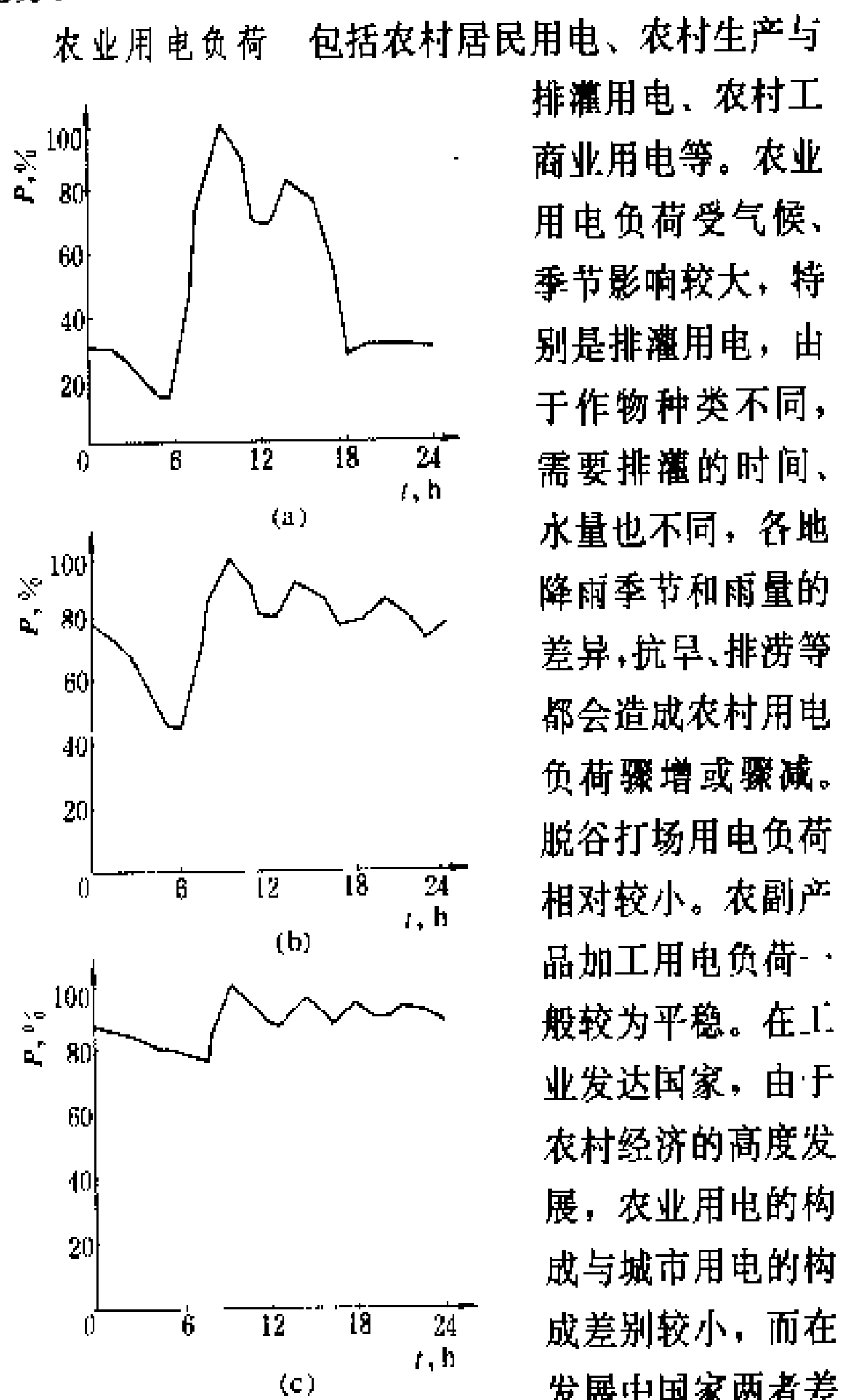


图1 不同班制企业的日负荷曲线  
(a) 一班制企业；(b) 两班制企业；(c) 三班制企业

主。80年代以来，农村工业发展较快，农村工业用电负荷增长相对较快，农业用电负荷受气候、季节影响的波动性有所趋缓，在今后一段时期，中国农业用电负荷的增长将继续遵循这一规律。

交通运输用电负荷 包括火车站、汽车站、航运码头、飞机场、航空站的动力和通风用电，电气化铁道和电气化运输机械的用电，以及车站、码头、机场基建用电等，这类负荷在全年内一般变化不大。

市政生活及照明用电负荷 包括城市公用事业、居民、商业、学校、机关、部队等的生活及照明用电负荷。其中公用事业用电负荷较为平稳，居民、商业等用电负荷受季节性影响却极为明显。因此，总的来看，这类用电负荷波动性较大，有时直接影响配电网峰值负荷的季节性变化，其影响程度取决于这类负荷在配电网负荷中所占的比重。在工业发达国家，家用电器（如

备餐电器、食品储存电器、调温电器、洗熨电器、电视

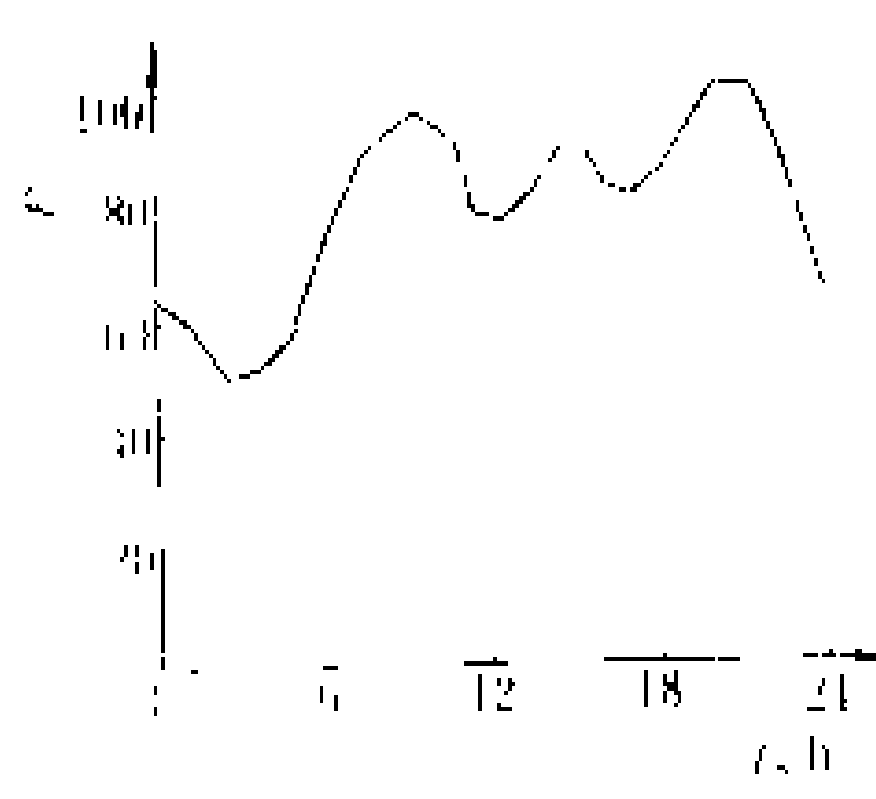


图2 城市中压配电线路的日负荷曲线

音响电器、清扫卫生电器、健康美容电器等)应用广泛，商业部门也广泛采用空调、电风扇、制冷设备等敏感于气候的电器，因此这类负荷在配电网负荷中比重较大，如美国、英国占60%左右，日本、法国、意大利占40%左右。而在发展中国家，市政生活及照明用电负荷的比重就较小。中国目前这类负荷占10%左右，随着国民经济的发展和人民生活水平的提高，将会不断增长。

实际上，公用配电线路大多是几类负荷混用的，其负荷特性是所包含的几类负荷特性的总体反映。图2为一条向工业用户和市政生活及照明用户供电的城市中压配电线路的日负荷曲线。

负荷特性的数据描述和实际应用 配电网负荷特性实用上常以负荷电气量(如电流、视在功率、有功功率、无功功率、功率因数、谐波分量等)随时间的变化规律来反映，可用曲线表示，更常用的是以数据来描述，并得到实际应用。

数据描述 用以描述负荷特性的数据有：①在特定时间内(如5min、10min)的平均需量和特定时期内(日、周、月、年度)最高的平均需量；②最高需量与装接容量之比的需用率；③最高需量与电网容量之比的利用率；④一段时间内平均负荷与高峰负荷之比的负荷率；⑤配电网总的最高需量与各分支负荷最高需量之和的同时率；⑥平均电能损耗和最大负荷时电能损耗之比的损失因数等。

实际应用 配电网负荷特性可作为合理规划配电网、配置供电设备容量、安排配电网运行方式等工作的基本依据。例如：①有功和无功电流用于配电网供电设备、无功补偿设备的配置和电压降的计算；②电流绝对值和损失因数用于电能损耗计算和设备热稳定的核算；③其它数据可用于负荷管理，制定调度计划，安排运行方式，实行分时电价计费等工作。

参考书目  
水利电力部生产司，计划用电，北京：水利电力出版社，1983  
Westinghouse Electric Co. Electric Utility Engineering Reference Book, Vol. 3: Distribution Systems, Pennsylvania: East Pittsburgh, 1959

(金辅夏)



peidianwang fuhe tongshilü

**配电网负荷同时率** (load simultaneity factor of distribution system) 配电网的负荷最大

值 $P_{\max}$ 与其各组成分支负荷最大值之和 $\sum_{i=1}^n p_{i\max}$ 的比

值,通常用 $K$ 表示, $K = P_{\max} / \sum_{i=1}^n p_{i\max}$ 。由于配电网

各分支负荷的用电性质不同,各自出现最大负荷的时刻不同,配电网负荷的最大值通常不等于而是小于各分支负荷最大值之和,故 $K$ 值通常小于1。同时率的倒数 $1/K$ 称为参差率或分散系数。

设 $C_n$ 是合成的最大负荷值中所包含的第 $n$ 个负荷值与第 $n$ 个负荷的最大值的比值,即 $C_n = P_{\max(n)} / p_{n\max}$ ,

称为分量系数,则同时率 $K = \sum_{i=1}^n C_i p_{i\max} / \sum_{i=1}^n p_{i\max}$ 。一

般分量系数 $C_i$ 和各个负荷最大值 $p_{i\max}$ 是任意值,但考虑某一些负荷时,可出现两种情况:①各个 $p_{i\max}$ 值相同,而 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 各不相同,则 $K = (C_1 + C_2 + \dots + C_n) / n$ ,即同时率等于平均分量系数;② $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ ,而各个 $p_{i\max}$ 不同,则 $K = C_1$ ,即同时率等于分量系数。例如居民用电,每户的最大负荷大致相同,但由于生活习惯不同,最大值不会同时出现,即属于第一种情况;空调负荷其最大值因空调机容量不同而各异,但几乎总是同时使用的,故属于第二种情况。

由于组成配电网负荷的类别和所占比例千差万别,确定一个配电网的负荷同时率是一件非常复杂的工作,只有从现有各种类型的配电网通过实测和统计分析,才能得出一定规律,供配电网规划工作时参考。

(金辅夏)

peidianwang fuhe yuce

**配电网负荷预测** (load forecast of distribution system) 对配电网未来一定时期内负荷的

功率和用电量的预测。其目的是为配电网调度运行部门和规划设计部门提供制订工作计划和发展规划所需的数据和资料。按预测期限的不同可分为短期、近期(如5年)、中期(如10年)和远期(如20年)的预测,其中近期、中期和远期的负荷预测通常也统称为规划设计负荷预测。

**短期负荷预测** 一般用于配电网调度运行,以预测负荷的功率为主,据以制订电力生产计划,决定配电网运行方式和安排设备检修及更换程序。根据需要,短期负荷预测可在年内按月、按周、按日、按小时、甚至按分钟进行连续预测。短期负荷预测的方法很多,各国的实践经验表明,以时间序列法较为成功。负荷预测是

运用依据对负荷的过去历史资料进行分析而建立起来的、能正确反映目前负荷与过去负荷及干扰因素(即引起负荷发生变动的因素)之间数学关系的预测模型来完成的。经常采用的数学模型有自回归模型(AR)、动平均模型(MA)、自回归-动平均模型(ARMA)和累积式自回归-动平均模型(ARIMA)四种。负荷预测的基本方法分为四个步骤:①确定要预测的量(功率还是用电量)以及预测量的时间间隔,并按这些要求取足够多的历史记录资料;②分析负荷的历史资料,建立最适于描述这个负荷变化过程的模型,根据模型本身的特性及已知负荷记录资料,对它进行辨识与参数粗估计;③进行参数的精确估计和模型使用合理性的检验;④建立预测模型,在连续预测过程中,对于在线预测,预测模型将不断调整本身的参数;对于离线预测,应不断校正预测模型。

**规划设计负荷预测** 包括近期、中期和远期负荷预测,是编制配电网规划设计的基础和依据。负荷预测数字应与规划年限相配合,近期按年分列,中期、远期可只列规划期末的数字,但用电量的预测往往是包含在最大有功功率预测之中的。因此,配电网的负荷预测方法通常是指最大有功功率的预测方法。采用的基本方法是电量预测法和负荷密度法。(见配电网规划)

**电量预测法** 先预测年用电量,再除以最大负荷利用小时数从而得到最大负荷数值的方法。年最大负荷利用小时数可用年平均日负荷曲线的负荷率乘以时间8760h求得。电量预测法一般可按工业、农业、交通运输、市政生活等负荷分类进行,具体可采用的预测方法较多,常用的有单耗法、综合用电水平法、外推法和弹性系数法四种。

(1)单耗法。根据计划产品数量(或产值)和用电单耗来推算年用电量。此法适用于有单耗指标的工业和部分农业负荷,其准确程度取决于产品数量、所掌握的单耗变化趋势和产品结构变化的正确性。

(2)综合用电水平法。根据地区人口和每人平均年用电量来推算年用电量。此法适用于预测市政生活用电,其关键在于依据充足、参数适当(如先对典型小区进行调查分析),最好作出综合用电水平指标的分项分析。

(3)外推法。运用历史资料和数据加以延伸,来推测未来各年的用电量。此法适用于历史资料较为完整的现有配电网。常用的外推法为回归分析法和平均增长率法。回归分析法是用时间、人口、工农业产值等相关因素作自变量,以用电量作因变量,根据历史规律用数理统计方法求出适当的数学模型,来测算未来的年用电量。平均增长率法是根据历史规律和未来国民经济发展规划,估算出今后的用电量平均增长率,在一定

时期内可采用同一增长率来测算，也可采用分阶段的不同增长率来测算。

(4)弹性系数法。电力弹性系数是所考核地区的总用电量平均年增长率与工农业总产值平均年增长率的比值。电力弹性系数应根据地区用电性质、各类用电比重发展趋势，再参考历史资料加以分析后慎重确定。弹性系数法一般只适用于校核中期或远期的预测。

负荷密度法 将配电网供电范围分成若干功能区，由各分区现有负荷值计算现有负荷密度值，然后根据地区规划中有关的分区规划，如经济发展、产业结构、市政建设、人口、居民生活水平等，参考国内外类似分区的用电水平，估计规划期内各分区可能达到的负荷密度预测值。此法适用于地区内大量分散的用电负荷，至于少数集中用电的大负荷，可另作为点负荷单独考虑。(见配电网负荷密度)

在配电网规划设计中，为了决定各级电压变电所的个数、容量以及其地区分布，在预测配电网供电地区总负荷的同时，尚需预测分电压等级负荷或分区负荷数值。实际应用中，可用地区最大负荷预测值乘以负荷分散系数(通常大于1)后，再分配到各电压等级或各分区，得出相应的负荷分布情况；也可以用预测到的各电压等级或各分区负荷值之和，除以负荷分散系数，来求得总的地区负荷预测值。

(金辅夏)

peidianwang guzhang

配电网故障 (distribution system fault)

由于各种原因造成配电网的设备损坏或使配电网处于非正常运行状态。配电网故障通常有架空线断线、倒杆、绝缘子对地闪络或击穿并发展成为多相短路而导致线路跳闸、电缆绝缘损坏造成接地或引起跳闸、继电保护装置误动作引起跳闸、变压器绝缘受潮损坏或异常过负荷引起跳闸等。配电网故障将造成供电中断，影响生产，甚至造成人身伤亡，必须在短时间内设法消除故障或加以隔离，使配电网恢复正常运行。

故障类型 按其产生的原因不同，通常分为设备本身故障、恶劣环境引起的故障、人员过失引起的故障以及外力损坏故障四类。①设备本身故障：由于配电网设备本身的绝缘结构或材质，在配电网的运行电压、异常过电压或过负荷情况下，长期运行引起老化变质发展成为故障。此外，设备绝缘受潮性能下降，机构磨损等原因都可能发展成为故障。②恶劣环境引起的故障：由于暴风雪、强台风、强雷暴、特大迷雾、严重覆冰等自然现象及人为造成的大气或地下的严重污秽环境，大大超过原设计的机械和电气性能所能承受的水平，致使设备损坏发生故障。③人员过失引起的故障：由于

电业内部各类专业人员的过失(如设计人员的错误、检修人员检修不良、运行人员监视不力或调度操作错误、管理人员失职等)引起的故障。这类故障的主要原因是人员责任心不强，技术素质不高。④外力损坏故障：非电业部门人员违反规章制度工作造成电业设备损坏而引起的故障，如各种设施之间相互安全间隔不够，绿化树木生长过盛碰及导线，汽车碰撞电杆等交通事故，事先未征得电业部门同意任意打桩、挖掘路面损坏地下电缆，航道上过往船只不顾岸上警告标志而任意扬帆抛锚拉坏架空过江线路或水下电缆等。

防止对策 主要有：①技术上，要从设备选型、设计、监造、安装、验收、投运及维修等方面进行全面质量管理。②组织上，要加强工作人员的思想教育及业务培训，并建立生产管理和安全质量保证的组织体系。③加强社会上的宣传教育，利用各种宣传工具和社会力量，教育广大群众、工厂职工，达到人人爱护电力设施，同时还要制定法律和条例，对破坏电力设施的人员绳之以法，以杜绝外力破坏。

(应日瑜)

peidianwang guihua

配电网规划 (distribution system planning)

配电网发展和改造的总体计划。其目的在于以恰当的投资增加配电网的供电能力，适应负荷增长的需要和改善配电网的供电质量。配电网规划包括对原有配电网的改造和扩建以及兴建新的配电网两个方面。具体内容有规划年限的确定、规划编制、经济分析以及规划实施。

规划年限 配电网规划年限与城乡地区总体规划的年限一致，一般有近期(5年)、中期(10年)、远期(20年)三个阶段。高压配电网与中压配电网的供电范围大，负荷中包括各小区低压负荷的总和，虽然低压负荷的实际数值可能与预测的数值不同，有增有减，但总和的变化不会太大，不会影响远期规划的有效性。且因高、中压配电网的工程量大，建设期长，前期工作要早做，所以应制定远期、中期和近期规划。低压配电网受当地负荷变化的直接影响，使其远期规划的有效性降低，且低压配电网的工程较简单，可在短期内建成，因此制订近期规划即可。在规划实施过程中，由于高、中压配电网中最近二年的工程项目实际已在施工，因此近期规划一般指从第三年开始的近五年中每年的规划。对低压配电网则是从现在开始的近五年中每年的规划。规划制订的顺序是从远期规划开始，然后依次为中期规划、近期规划。中、近期规划中的项目可从远期规划中已确定的项目中摘录出来，这样可使最终建设的配电网不会与所规划的配电网偏离太大。远期规划



又是每个年度规划的积累品,不过在贯彻过程中总受城市规划的变动、负荷的变化和技术进步等因素的影响,而作必要的修正,使最终建设的配电网与原制订的远期规划有一定的变动。配电网的规划,是以远期规划指导中期、近期规划,以中期、近期规划落实和调整远期规划。

**规划编制** 配电网规划的编制主要由当地供电部门负责,结合城乡规划和电力系统规划进行。

根据负荷预测结果,在符合所规定的各种技术原则下,结合现有电力网的实际情况,高压、中压配电网的远期和中期规划主要确定:①待建的和扩建的 35~110kV 变电所和 220kV 终端变电所的容量和位置;②上述变电所的高压进线路径和接线;③上述变电所的供电范围、二次侧出线的安排和每条出线的供电区域;④高压、中压配电网布局的电气计算,包括有功功率平衡、无功功率平衡、电压水平、线路损耗、供电可靠性等;⑤分期建设的工程项目、投资,主要设备的规范和数量估算;⑥提出必要的多种方案作技术经济比较。

近期规划则为适应近期负荷增长的需要从远期规划中摘录出来某些项目,以达到规定的目标供电质量。低压配电网的近期规划内容为确定配电变压器的数量、容量与分布,以及该低压配电网的供电区域,以适应低压负荷增长的需要。

目前有些国家的大城市供电部门已采用计算机辅助城市配电网规划设计,可以通过计算机进行大量的精确计算,并节省了人力和时间。其规划设计内容包括负荷分块预测,变电所、配电所定位和数量确定,线路路径,网络分析计算,可靠性分析,经济分析评价等方面。计算机辅助规划设计的成功应用必须以强大的配电网信息数据库(包括图形系统)为基础。

配电网规划的内容还应包括为达到规划目标而提出的对电源建设的要求,调度通信及自动化方面的措施等。

**经济分析** 配电网规划中,对参与比较的各个方案都要进行经济分析,以便选取最佳方案。方案中的一切费用和效益都应考虑时间因素,将不同时期发生的费用和效益折算为现值,这样才具有可比性。通常参与比较的各方案的条件一般相同,可采用年费用最小法,选取年费用最小的方案作为最佳方案。还可采用优化供电可靠性原则进行方案比较,以取得供电部门和全社会的最大综合经济效益为选取最佳方案的标准。

**规划实施** 配电网规划应与城乡规划和建设部门密切配合,统一安排实施。配电网规划具体要通过年度计划来实现。年度计划以近期规划为依据,由于负荷预测的不确定性或政策的变化,可根据当年的具体情况作必要的调整。年度计划内容包括当年投产工程、在建

工程和前期工程三方面,相互间要有一定的比例,做到工程有储备,以保证规划项目在实施上的相互衔接。

(唐德光)

peidianwang jisuanji fuzhu guanli

**配电网计算机辅助管理** (computer-aided management of distribution system) 利用计算机对配电网加强运营管理以提高工作质量和效率的一种现代化配电网管理手段。它与配电网监控和数据采集系统(Supervisory-Control and Data-Acquisition System, SCADA)和电度量自动测录系统(Automatic Meter-Reading System, AMR)共同组成配电网自动化系统(Distribution Automation System, DAS)。它以配电网自动地图绘制管理和设备管理系统(Automated Mapping and Facilities Management System, AM&FM)以及营业管理系统(Customer Service Management System, CSM)为核心,通过与配电网自动化系统中的 SCADA 系统和 AMR 系统的在线或离线联系,输入配电网运行信息和用户用电信息,实现诸如运行管理、巡视管理、检修管理、停电管理、配电变压器负荷管理、电压和无功管理、设备资料管理、配电网地图绘制管理、高低压计量管理、用户资料管理等功能,为配电网提供技术管理服务。它还向配电网经营管理系统提供配电网技术资料,为经营管理系统实现在线联网创造条件。配电网计算机辅助管理系统的组成和有关系统相互间的关系如图所示。

自动地图绘制管理和设备管理系统(AM&FM)其功能是在地形图的基础上储存配电网图形数据资料和非图形参数等。例如一条配电线路和一台配电变压器,在一般电气图上只是一条线和一个变压器符号,但在本系统中是一条符合地理位置的线路和一台用变压器符号代表的配电变压器,并且相应地存储有配电线路的诸如线径规格、长度、安装结构形式、负荷值及潮流方向、电压值等数据资料和配电变压器的诸如型式、规格、出厂编号、制造日期、安装日期、安装形式、保护方式、负载电流、二次侧三相电压等数据资料。利用这些数据资料可进行负荷潮流、电压损失、线路损耗、指定点的短路电流值等的计算和分析,为设备运营管理提供技术数据。

营业管理系统(CSM) 其功能是存储和处理大量非图形的数据资料和电气单线接线图等图形资料。例如存储从用户申请用电开始发生的技术文件,设计和施工资料、负荷和用电量资料等数据资料,以及用户变、配电所的单线接线图等图形资料。

对计算机的要求 计算机辅助管理系统对计算机的要求是:①以具有小型计算机功能的计算机作数据

管理,以微机做工作站的终端机;②有易于操作应用的绘图软件;③有能处理和管理大量数据的数据管理系统;④有高分辨率大屏幕的图形工作站,能输入图形和非图形信息,输出清晰图形;⑤有大容量高速联机存储器;⑥有不停电电源、密码保护、数据备份等保证系统运行可靠的措施。

现状和发展 配电网计算机辅助管理在欧美主要工业发达国家于 20 世纪 60 年代初开始研究和开发,

### 参考书目

IEEE Tutorial Course. Distribution Automation.  
IEEE Course Text 88EH0280-8-PWR, 1988

(陈效杰)

peidian wangluo jiegou

### 配电网结构 (configuration of distribution network)

(configuration of distribu-

tion network)

配电网中各主要电气元件的电气连接型式。在各种网络结构型式,通过各个元件(包括变压器、母线、断路器、配电线路)的不同运行状态,可组成配电网在正常和异常情况下电能的各种配送方式,从而可以得到不同的供电可靠性、运行经济性以及调度灵活性等。研究配电网结构的目的,在于分析配电网的特点和使用要求,从而选择最适合具体地区配电网特点的网络接线型式。在选择方法上,一般需要提出多种不同的网络接线方案,进行全面的技术经济比较,并考虑工程实施上的可行性等要求,作出综合评价,确定最佳方案。

配电网结构型式基本上分为放射式和网式两大类型。在放射式结构中,电能只能通过单一路径从电源点送至用电点;在网式结构中,电能可以通过两个及以上的路

径从电源点送至用电点。网式结构又可分为多回线式、环式和网络式三种。

放射式配电网 一路配电线路自配电变电所引出,按负荷的分布情况,呈放射状延伸出去,散布于整个供电区域,所有用电点的电能只能通过单一的路径供给(见图 1)。放射式配电网的优点是设施简单,运行维护方便,设备费用低,适用于低负荷密度地区和一

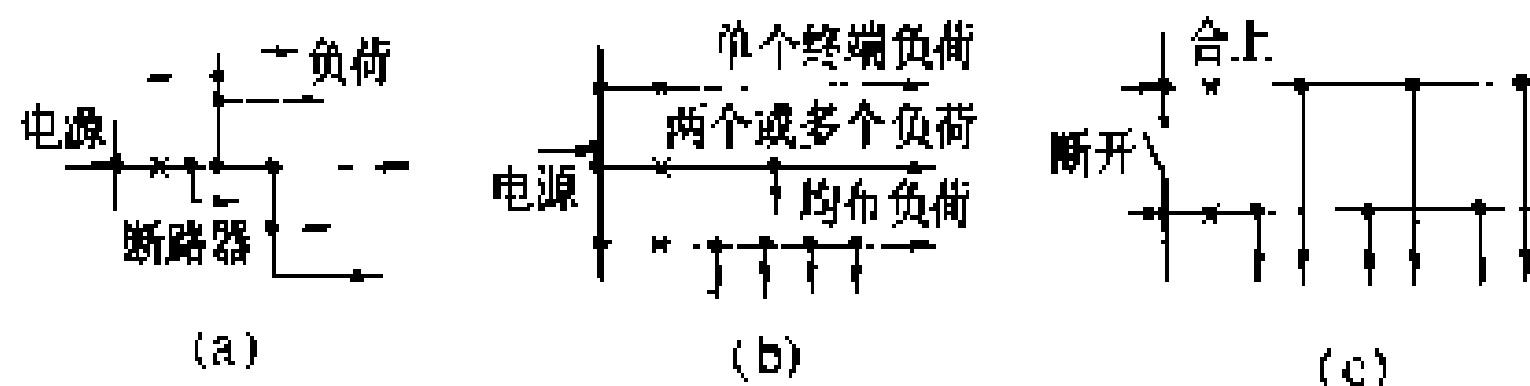
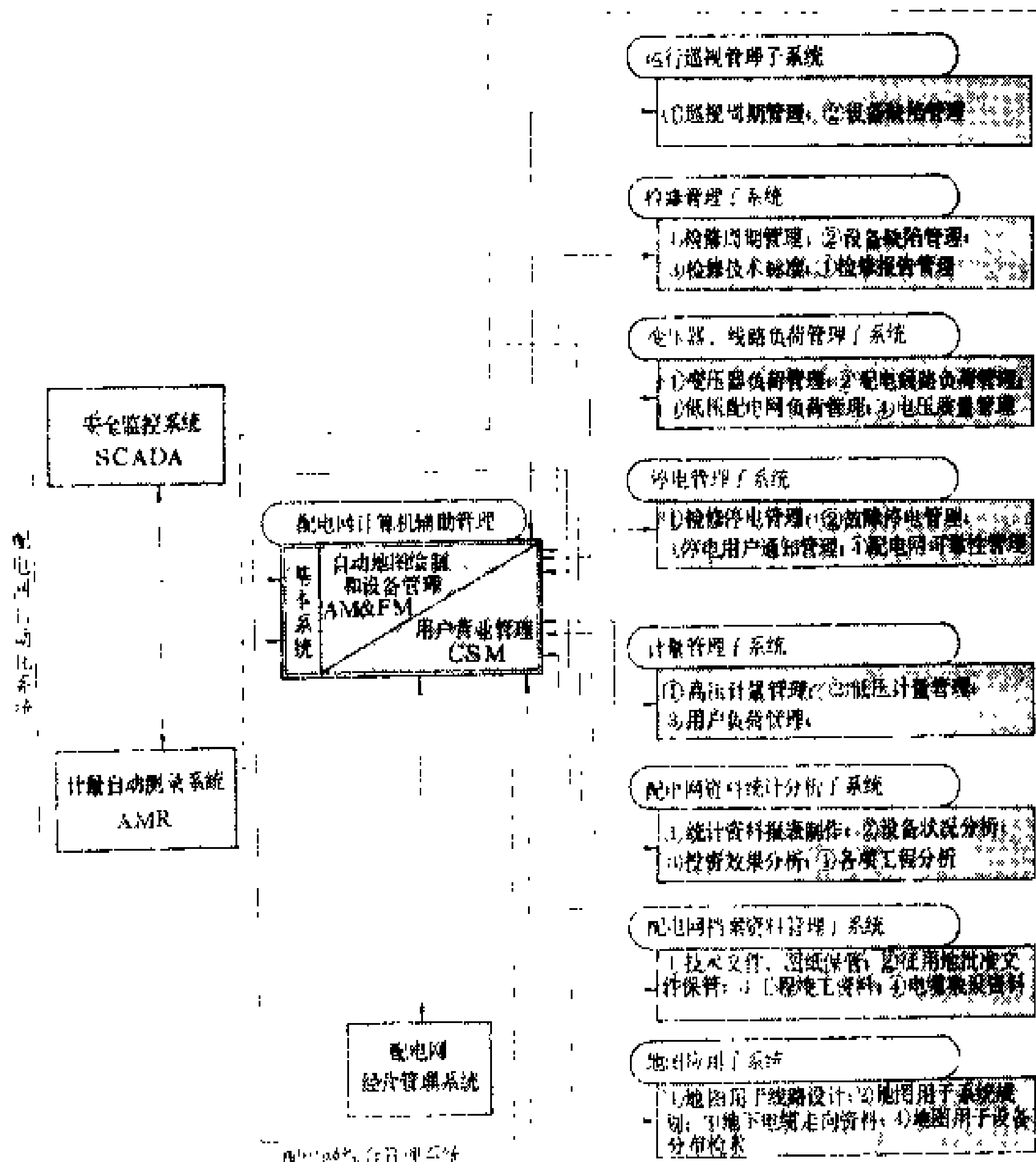


图 1 放射式配电网

(a) 树枝放射; (b) 单线放射; (c) 双线放射



配电网计算机辅助管理系统的组成和联系示意图

一般从单项功能的开发,逐步发展到多项功能和资源共享,并发展到 AM&FM 系统。美、德、日等一些国家的一部分电力企业,从 80 年代初已用于实际运营管理,但都各具特色,尚不很完善和系统化。目前,各国一些电力企业已提出配电网计算机辅助管理的发展开发计划,向完全代替配电网管理和运行部门的主要管理业务发展。中国从 70 年代开始,有不少电力企业陆续开发了一些单项管理功能并投入使用,有些企业已将这些单项功能相互联系起来,形成一个简单的计算机辅助管理应用软件系统。AM&FM 系统的功能和采用后的效果已为中国一些电力企业的有关人员所了解,某些计算机应用较普及的企业也已着手开发和考虑应用。

般的照明、动力负荷供电。只要不超过线路的额定容量并满足电压质量要求，放射式的配电线路就可以逐步延伸，以适应新增加的用电负荷的需要。放射式配电网的缺点是供电可靠性低，一旦配电设施有故障就会造成大量用户停电。为了弥补这一缺点，部分用户可以视其对供电可靠性要求的不同，从邻近配电网取得适当容量的备用电源。在中压和低压的放射式配电网中，通常还装设分段断路器将线路分成适当的区段，而且在适当的分段处与相邻线路之间装设联络断路器，使得放射式配电线路发生故障时的停电区段缩小，或将部分非故障区段切换到相邻线路，以保证继续供电。这种形式连接的放射式结构在城市的中、低压配电网中使用较多。

**多回线式配电网** 多回配电线路（一般是平行敷设的）自配电变电所引出接到受电端，正常时各条配电线路并列运行，平均分担全部负荷，当一条配电线路有故障时，可自动将其切断隔离，其余的配电线路有足够容量承担全部负荷（见图2）。多回线式配电网至少有两回配电线路，但一般为3~4路或更多回路。多回线

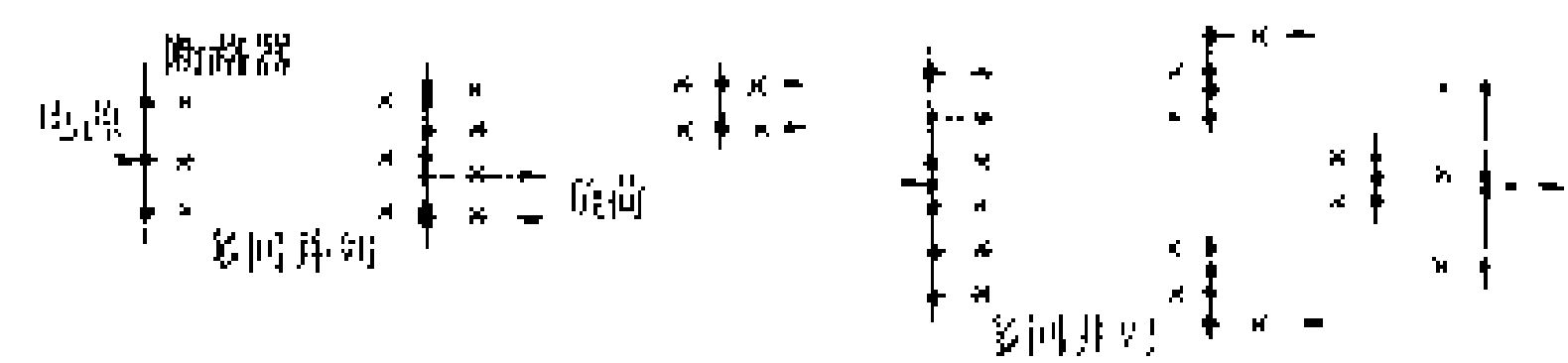


图2 多回线式配电网

式配电网比放射式配电网可靠性高，一回配电线路故障时，不会造成用户停电，有需要时还可达到在第二回配电线路故障时不使用户停电的要求。电缆配电网故障测寻和故障修复时间较长，故常采用这种多回线的结构。多回线式配电网的主要缺点是继电保护配置比放射式配电网的要复杂。

**环式配电网** 配电变电所引出的配电线路连接成环形，每个用电点自环上不同部位接出（见图3）。简单的环式配电网是二回配电线路自同一（或不同）配电变电所的母线引出，利用联络断路器（或分段断路器）连接成环，每个用电点自环上T形或Ⅱ形支接。当环路上某区段发生故障时，利用分段断路器切换隔离后，其他区段上的负荷可继续供电，这是环式配电网的特点。将联络断路器经常断开，只有当某区段发生故障或停电作业时才倒换闭合的运行方式称为常开环路方式；而将联络断路器经常闭合的运行方式称为常闭环路方式。闭环运行增加装置的复杂性，但可改善配电网内电流分布，减少电压降和功率损耗。环式配电网的主要缺点是：若不配置自动化装置，当线路某一区段发生故障时，此线路将全部停电，要先逐段查出故障点，经隔离后才能恢复供电。（见配电自动化）

**网络式配电网** 自配电变电所的同一母线引出多回中压配电线路（一般至少三路），配电线路上的各配

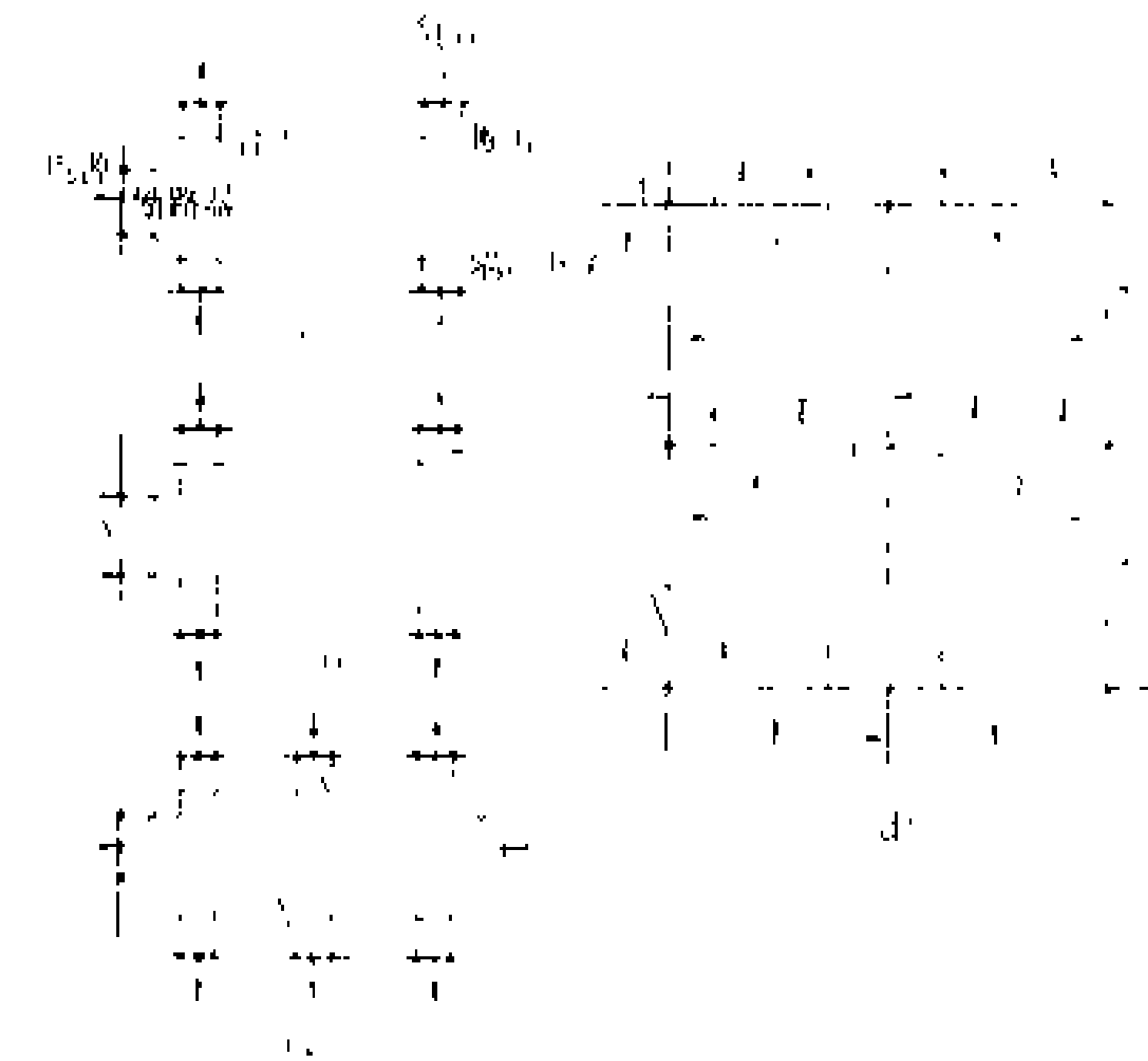


图3 环式配电网

(a)、(b)、(c) 环式电缆配电网；

(d) 环式架空配电网

电变压器的低压侧均连接在一起，形成网络布置，用电点都自网上接出，任何一回配电线路或变压器停电时，用电负荷不会停电。网络式配电网又可分为格网式配电网和点网式配电网两种。

(1) **格网式配电网**。用于大城市的低压电缆配电网，由来自同一电源但不同配电线路的多台变压器的低压电网实联或通过熔

断器并联组成（见图4）。例如英国伦敦的格网式配电网，由4台750 kV·A的配电变压器的低压电网实联为某一个区域供电，再与邻近区域的实联电网用熔断器并联。低压电缆故障时，故障点由短路电流烧清（burning clear），除瞬时电压下降外，不影响供电。中压电

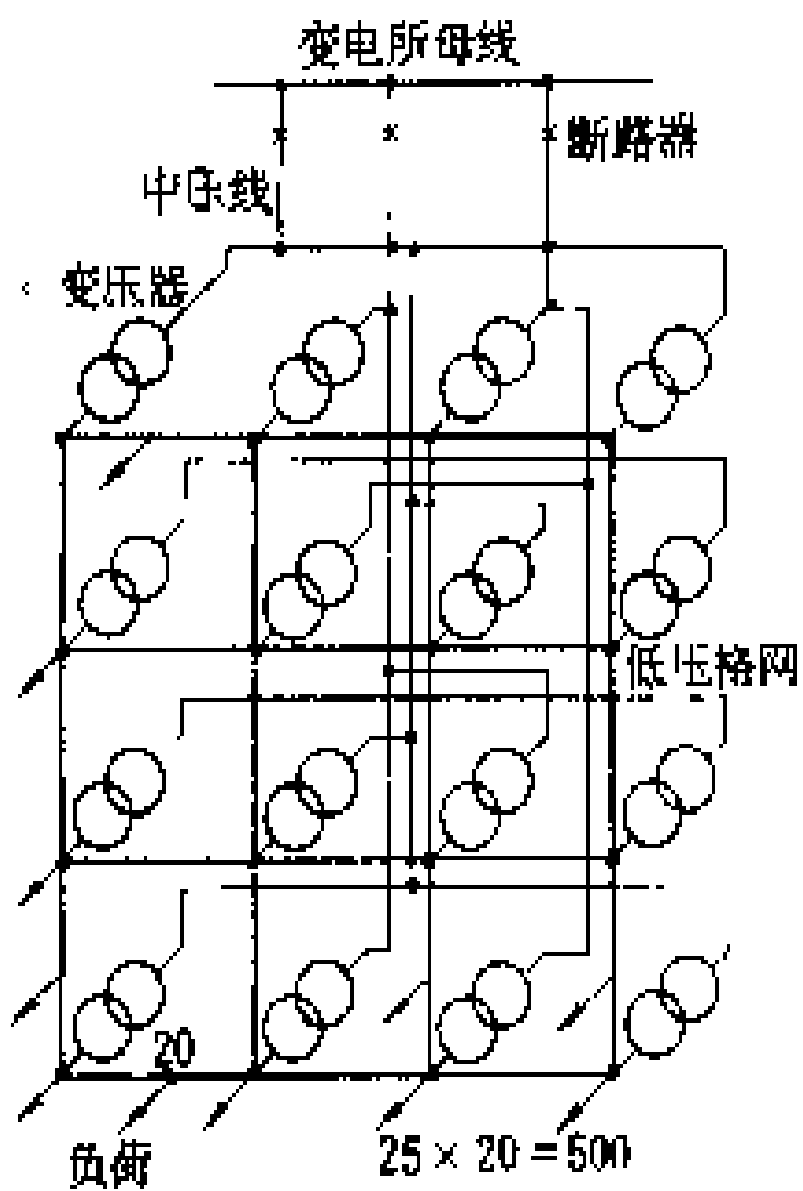


图4 格网式配电网

缆故障时，电源侧断路器跳闸，配电变压器的低压侧断路器由反馈的励磁电流使逆功率保护动作跳闸，实现从高、低压两侧隔离故障，格网仍维持供电。格网式配电网供电可靠性高，线损小，电压质量好，但保护复杂，建设费用高。（见格式网络）

(2) **点网式配电网**。适用于大城市较大的集中负荷（如大楼、工厂等），由来自同一电源的多回配电线路（一般是二回）供电。用电点的每台配电变压器分别接到一回配电线路上，各变压器的低压侧连接到共同的



母线(常称低压网络母线)上,用电负荷自此低压母线上接出(见图5)。通常每回配电线路上还支接有本地

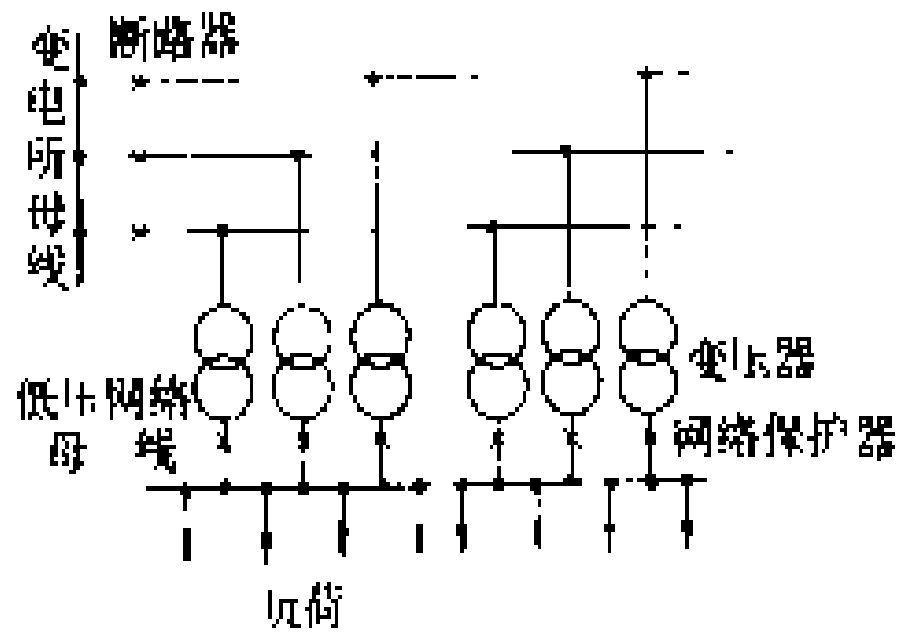


图5 点网式配电网

区的其他点网式供电的用户。点网式配电网在运行中,各配电变压器低压侧实联,平均分担负荷,电压变动小,一台变压器回路故障时,不会造成停电,供电可靠性高。但其保护配置比较复杂,低压侧要装设较灵敏的网络保护器(其动作原理类似于格网式配电网中的逆功率保护),而且低压侧的短路容量较大,因此点网式配电网的容量不能建得太大。

**现状和展望** 架空配电网,放射式是主要的接线方式。城市中一般都为沿道路组成的棋盘格式的开式网络,提高了运行的灵活性,为提高这种结构的供电可靠性,有的在杆架开关设备上加装继电保护跳闸,重合闸和其他自动化设备,以减小故障时的停电区域和尽快恢复供电。

电缆配电网,由于故障后修复时间长,对大容量或重要负荷,一般用两回或两回以上的配电线路供电,在用电端可切换。对一般用户,用环式配电网开环运行的方式供电,电缆故障时,可通过操作先恢复供电。近年来,由于电子计算机等先进设备的普及,对配电网的可靠性提出了更高的要求,因此在环网设备上开发了一些自动化装置,如电缆故障段自动检测显示,按预编程序自动隔离故障、恢复供电等。实联运行的电缆配电网中,低压格式网络曾风行于欧美大城市,近几年来由于其短路容量随负荷增长而不断增加,出现了不少问题,且由于低压线路停电造成的少送电损失相对较小,因此有些城市不准备再发展这种网络结构。中压实联配电网,可提高电缆利用率,减少变电所出线电缆,但需配置纵差保护,运行比较复杂,只在一些国家的局部地区有所应用。

由变电所和配电线路组成的配电网,其发展趋势是简化变电所和网络结构,减少开关装置的数目,而且在二次保护和自动化方面加以改善,以维持原来的运行灵活性,从而节约变电所用地和设备总投资。

参考书目

日本电气学会, 电工技术手册 第3卷, 北京: 机械工业出版社, 1984  
(電気学会, 電気工学ハンドブック, 1978)  
Westinghouse Electric Co. Electric Utility Engineering Reference Book, Vol. 3: Distribution

Systems. Pennsylvania: East Pittsburgh, 1959

(唐德光)

peridianwang rifuhe

配电网日负荷率 (daily load factor of distribution system)

配电网日平均负荷( $P_{\text{av}}$ )与日最高负荷( $P_{\text{max}}$ )的比值,一般用 $r$ 表示, $r=P_{\text{av}}/P_{\text{max}}$ 。它反映一日之内配电网负荷变动的情况,是配电网的运行特性之一。配电网的负荷通常用有功功率计算,

在已知日用电量 $A_d$ 时, $r=\frac{A_d}{24P_{\text{max}}}$ , 此处的 $P_{\text{max}}$ 必须以千瓦为单位。 $r$ 的值一般在0~1之间。 $r$ 的数值越小,日负荷曲线的波动就越大; $r$ 的数值越大,日负荷曲线就越平稳。

**日负荷率与负荷性质的关系** 配电网的日负荷率因负荷性质的不同而异。工业用电负荷与行业性质、生产方式、生产班制、工艺用电、动力用电所占比重有关。电冶炼、化学工业、石油工业的生产过程在一昼夜间是连续的,负荷很均匀,几乎不受任何外来因素的影响,其 $r$ 值一般在0.9以上。其它工业用户的负荷受企业的生产轮班制度影响较大,一班制工业用电负荷的日负荷率最小,两班、三班制的相对较大。建材、造纸、纺织等工业用电负荷的 $r$ 值一般为0.8~0.9,机械制造、食品加工等工业用电负荷的 $r$ 值一般为0.6~0.7。城市生活用电负荷的日负荷率与城市人民生活水平及商业、文化、福利事业发达程度有关,家用电器越普及,商业、文化、福利事业越发达,日负荷率就越高。中国城市生活用电负荷的 $r$ 值一般为0.3~0.4。交通运输业用电负荷的 $r$ 值一般在0.4左右,其中电气化铁道负荷较均匀, $r$ 值一般在0.7左右。农村用电负荷的 $r$ 值一般均较低。中国目前农村工业大多为一或两班制生产, $r$ 值一般在0.6左右,农村照明负荷的 $r$ 值在0.25左右,而农业排灌随季节影响变化较大,冬季的 $r$ 值为0.1~0.2,夏季却高达0.9以上。

**日负荷率的适度调整** 配电网日负荷率的大小取决于其负荷的构成,即用电负荷组成的种类、比重及其相互之间的关系。工业用电负荷所占比重较大的配电网,其日负荷率较高,而市政生活用电、交通运输及农村用电负荷所占比重较大的配电网,其日负荷率就较低。一般来说,发达国家的配电网日负荷率较低,而发展中国家的配电网日负荷率较高。就配电网运行的安全、经济性而言,日负荷率过高,表明发、供电能力裕度较小,对调度运行的灵活性和供电的安全可靠性都是不利因素;而日负荷率过低,则表明电力设备利用率过低,降低了配电网运行的经济性。因此,配电网的日负荷率应根据本国、本地区的具体情况进行必要的调

整。中国一般地区配电网负荷的构成决定了日负荷率普遍较高,在近期内,由于生产发展速度较快,电力供应仍较紧张。在发、供电设备容量不够充裕的情况下,为满足国民经济各部门的用电需要,尚需以计划安排等行政手段、分时电价等经济手段及负荷监控等技术手段来调整日负荷,但这涉及到全社会的生产安排和生活秩序,因此,调整必须适度。从发展趋势看,中国一般地区配电网日负荷率较高的局面可能会持续相当一个阶段,直至经济发达至一定程度,负荷构成有了较大的变化,发、供电设备容量相对充裕时,配电网日负荷率才会有适量的降低。

(金辅夏)

peidianwang rongzaibi

**配电网容载比** (capacity-to-load ratio of distribution system) 配电网设备的额定容量  $S_n$  与所供年平均最高有功功率  $P_{max}$  之比,一般用  $R$  表示,即  $R=S_n/P_{max}$ 。有些国家或地区习惯用配电网设备的额定容量  $S_n$  与所供年平均最高视在功率  $S_{max}$  之比的倒数,称为配电网设备利用率。由于变压器和线路是配电网的主要供电设备,故配电网容载比又分为变电容载比和线路容载比。在配电网规划设计中,为满足预测负荷的用电需要,首先要经济合理地配置适当的变电容量。变电所的容量、个数和位置确定后,根据配电网结构就可相应地确定配电线路的容量、路数和走向。

**变电容载比** 配电网内同一电压等级的主变压器总容量与对应的供电总负荷之比,用  $R_t$  表示,其数值可由下式估算:  $R_t=K_1K_2/(K_3K_4)$ 。式中  $K_1$  为负荷分散系数,  $K_1>1$ ;  $K_2$  为平均功率因数;  $K_3$  为主变压器运行率,即系统最大负荷时该变压器的负荷与其额定容量之比;  $K_4$  为储备系数,包括事故备用系数和负荷发展储备系数。

在实际应用中,应参考计算结果,结合现有的统计资料和配电网结构形式来确定合理的变电容载比。变电容载比过大,将使配电网投资增大,造成设备容量空闲,电能成本增加;变电容载比过小,将使配电网适应性差,调度运行不灵活,甚至限制了正常供电负荷。变电容载比是配电网规划设计的一个基本数据,是研究配电网容载比的重点。中国按建设部、能源部于1993年联合颁发的《城市电力网规划设计导则》所推荐,大、中城市配电网的变电容载比一般取为:220 kV 电网 1.6~1.9, 35~110 kV 电网 1.8~2.1。

此外,还应通过加强和改善网络结构,使之既满足可靠性要求,又降低了容载比,以提高投资的经济效益。例如:变电所增加主变压器台数,次级电网增加转

移负荷的能力,提高功率因数,提高电网自动化程度,以及提高各变电点的负荷预测及变电容量配置的准确性等。

**线路容载比** 其概念和计算方法与变电容载比相似,但配电网接线和运行方式的变化,对线路运行状态的影响更为复杂,还涉及到线路压降等许多问题,故配电网线路容载比的数值在实用上意义不大,且难以合理确定。

(金辅夏)

peidianwang wugong buchang

**配电网无功补偿** (reactive power compensation of distribution system) 调节配电网无功功率供需平衡的措施,用以改善无功功率潮流,减少线路功率损失,确保供电容量和维持适当的电压。配电网无功补偿的方法分为无功功率补偿和降低无功功率消耗两个方面。

**无功功率补偿** 在消耗无功功率的设施的就近处设置无功补偿装置,用以提供无功功率来进行补偿和电压调节。补偿装置主要有并联电容器、同步调相机、并联电抗器三种。并联电容器是电感性负荷最常用的补偿装置。一般根据电压和无功容量的需要,把电容器组或电容器集中并联在变电所母线上或分散并联在用电设备上。当低压分散补偿时,为了避免单机个别补偿中开关设备开断时发生电动机自励磁的过电压危害,需限制补偿容量和不在惯性矩较大的机械上采用。电容器串联补偿主要用于长距离输电线路的参数补偿,也有的用于农村长距离的配电线路,以改善线路参数,减小电压损失(见串联补偿装置)。同步调相机是一种提供进相或滞相无功功率的同步电动机,通常装设在电压需连续调整的高压变电所内,根据系统所需的电压曲线不断调整所提供的无功功率。此外,部分用户在适当的技术改进后,采用带机械负荷的同步电动机进相运行或绕线式异步电动机同步化的运行方式,也可进行无功补偿。并联电抗器是为抑制负荷低谷时配电网无功功率过补偿引起电压过高而采用的补偿装置。20世纪70年代发展起来的静止补偿装置,主要用于长距离输配电线路的无功调节,以抑制工频过电压和提高稳定性,或者是对工业用户的冲击无功功率进行补偿,以抑制电压闪变。

**降低无功功率消耗** 通过合理使用电气设备,达到减少无功功率消耗的目的。主要有两种方法:①合理选用配电变压器、电动机的容量及其工作制度,尽可能提高其负荷率,以提高功率因数和效率。例如采用空载限制器(如电焊机空载断电装置、机床用Y-△自动转换器等),以避免间断性机械的空载运行;合理安排生

产和变压器投运台数，以减少空载损耗，提高功率因数。②尽可能减少电动机的无功功率消耗。如采用Y-△起动器、自耦变压器起动器，以减小电动机起动电流和无功功率消耗。对轻载运行的电动机，采用△-Y或串并联路数的绕组改接，降低每相绕组的实际承受电压，以降低电动机的实际容量，提高运行的功率因数。

参考书目

陆嘉年编著，并联电容器补偿，昆明：云南人民出版社，1981

(邵文灿)

peidianwang zhongxingdian jiedi fangshi

**配电网中性点接地方式** (neutral grounding practice of distribution network) 三相交流配电网中性点与大地之间的电气连接方式，又称配电网中性点运行方式。

**分类** 配电网中性点接地方式可分为有效接地和非有效接地两大类。

**有效接地** 包括中性点直接接地和中性点经低值阻抗接地两种。有效接地配电网的特征是：配电网零序电阻与正序电抗之比小于或等于1，零序电抗与正序电抗之比为正值，小于或等于3，即 $R_0 \leq X_1$ ， $\frac{X_0}{X_1} \leq 3$ 。式中 $R_0$ 为配电网在任何运行方式下任何一点至电源的零序电阻； $X_0$ 为配电网在任何运行方式下任何一点至电源的零序电抗； $X_1$ 为配电网在任何运行方式下任何一点至电源的正序电抗。在发生一相接地故障（金属性对地短路）时，故障相将通过较大的故障电流，其值最大可超过三相短路时的故障电流，此时非故障相的对地稳态电压不超过线间电压的80%，或小于正常运行时线对地电压的140%。大的故障电流对电气设备要求有高机械强度和高热稳定性。适当增大中性点接地阻抗值，可以减小一相接地时的故障电流，但同时会使非故障相对地电压增大。

**非有效接地** 不属于有效接地类的接地方式，包括中性点调谐接地（又称消弧线圈接地）、高阻抗接地和中性点不接地。在中性点不接地方式中，发生一相接地故障时，非故障相上的对地电容电流和绝缘泄漏电流将从故障点通过故障相导线流回电源。通过故障点的电流超过一定数值时，电弧不易自行熄灭，将发展为有多次重燃特性的弧光接地故障，易于产生弧光接地过电压，以致损坏设备。在这种情况下时，要将中性点改为经消弧线圈接地。当发生一相接地故障中性点对地电位升高时，消弧线圈中产生的感性电流流过故障点，抵消故障点电流中的容性电流，使故障点的残余电流减小，电弧易于熄灭；若仍不能熄弧，也不至引起线路

跳闸，但要发出信号，以便工作人员寻找故障点。此时，非故障相上的对地稳态电压应不超过线间电压的105%。

**应用** 选择配电网中性点接地方式时，除考虑配电网的各种运行情况（包括故障和异常运行）外，还应充分考虑供电可靠性的要求，故障时异常电压、异常电流对电气设备的影响，对通信的干扰和危险影响，有关的设计技术和继电保护技术要求以及现有配电网的运行经验等。

世界各国采用的配电网中性点接地方式，随电压等级不同而不同。在同一电压等级配电网中，其接地方式也不尽相同。在第一次世界大战期间（1914~1918年），德国工程师首先研制成消弧线圈，其后在各种电压等级的电力网中大量发展中性点经消弧线圈接地方式，从30~220 kV的系统中都采用了这种接地方式，甚至在柏林市的30kV、1400 km电缆配电网中，电容电流高达4000 A，也采用了消弧线圈接地方式。美国自1925~1945年的20年间，在22~70 kV的配电网中，中性点接地方式的变化如表1所示。由表1可知直

表1 美国22~70 kV配电网的中性点接地方式

年份	占系统容量的百分比（%）				
	直接接地	电阻接地	低电阻接地	消弧线圈接地	不接地
1925	46	≈0	12	2	40
1945	72	6	7	3	12

接接地方式占有明显的优势，且发展最快，不接地方式已逐渐被放弃。英国132 kV系统全部是直接接地，因为投资最经济，故障的选择性较好，暂时过电压较小，对通信干扰的程度能被通信部门所接受。英国的66 kV系统是多点电阻接地，33 kV及以下的架空配电网逐步由直接接地或电阻接地改为消弧线圈接地，电缆配电网仍为低电阻接地。日本的配电网中性点接地方式，以东京电力公司为代表，采用表2所列的标准。由于负荷的不断增长，东京电力公司对部分东京地区的6.6 kV三角形接线的系统升压为11.4 kV星形接线系统，因为该地区的变压器都是单相的，具有升压的便利条件。升压后的11.4 kV系统改为三相四线制，其中性点接地方式有四种：①高、低压侧共用中性线并多重直接接地；②高压侧中性点直接接地，低压侧中性线多重直接接地；③高压侧中性点经低电阻（小于50 Ω）接地；④高压侧中性点经高电阻（120~410 Ω）接地。采用何种中性点接地方式，按具体情况决定。苏联的110 kV系统直接接地，或消弧线圈接地。10~35 kV系统不接地或消弧线圈接地。低压系统直接接地。法国的负责全国电力事业经营管理的法国电力公司



(EDF)从1962年开始,将城市配电网的标准电压定为20 kV,限制或取消原有的10 kV及15 kV电压等级。20 kV配电网中性点经阻抗接地,对于全部是电缆的配电网,接地阻抗值按单相接地最大短路电流不超过1000 A选择,对架空配电网,按不超过300 A选择。

表2 东京电力公司配电网中性点接地方式

电压	66 kV	22 kV	6.6 kV	低压
接地方式	电阻接地 电抗接地 消弧线圈接地	电阻接地	不接地	直接接地

中国原水利电力部颁发的《电力设备过电压保护设计技术规程》对配电网中性点接地方式作了具体规定。某些地区根据具体情况,对中性点接地方式作了修改。归纳起来,情况如下:

(1) 110 kV配电网。一般采用直接接地方式,也有少数采用电阻接地或消弧线圈接地。

(2) 3~63 kV配电网。一般采用不接地方式,当一相接地故障电流超过一定值(3~10 kV配电网大于30 A,20 kV及以上配电网大于10 A)时,采用消弧线圈接地。若一相接地故障电流超过数百安,设备绝缘较弱,可采用低电阻接地。

与发电机或调相机电气上直接连接的3~20 kV配电网,采用非有效接地方式。当一相接地故障电流大于5 A时,要采用消弧线圈接地。

(3) 380/220 V低压配电网。一般采用直接接地,某些地区的农村低压配电网为减少人员触电危险,也有采用不接地方式的。

在实际工作中,中性点接地装置连接在变压器星形接线绕组的中性点上。在无星形接线中性点时,则采用专供接地使用的接地变压器。

参考书目

Willheim R, Waters M. Neutral Grounding in High-voltage Transmission. London: Elsevier Publishing Co., 1956

Tokyo Electric Power Service Co., Tokyo Electric Power Co. Outline of Urban Distribution Network Planning I-1. Tokyo, 1989

(王一字)

peidian xianlu  
**配电线路** (distribution line) 向用户分配电能的电力线路。中国根据自己的国情,将110 kV及以下的电力线路都列为配电线路,其中较高电压等级的配电线路,在农村配电网和小城市中,往往成为该配

电网的唯一电源线,因而也会起到输电的作用。特别是110~150 kV线路,在国外也常被称作次输电线路(subtransmission line)。(见输配电、输配电电压等级、配电网电压等级)

配电线路按其运行电压不同可分为:高压配电线路(35~110 kV)或称次输电线路、中压配电线路(10 kV)或称一次配电线路、低压配电线路(380/220 V)或称二次配电线路三类。各级电压的配电线路可以构成配电网,也可直接以专线向相应的用户供电。配电线路按其结构不同,可分为架空配电线路与电缆配电线路;按其供电对象不同可分为城市配电线路与农村配电线路。(见高压架空配电线路、中压架空配电线路、低压架空配电线路)

架空配电线路与电缆配电线路 架空配电线路是利用杆塔或其他建筑工程的支架并借助绝缘子和金具将导线架设于空间向用户配送电能的电力线路,如图1所示。电缆配电线路是将电力电缆直接埋于地下、水下或敷设在管道中向用户配送电能的电力线路。电缆配电线路一般在下列地区采用:①架空线路走廊在技术上难以解决的地区;②繁华市区及对市容有较高要求的地区;③重点风景旅游区;④对架空线严重腐蚀的特殊地区。(见电力电缆线路)

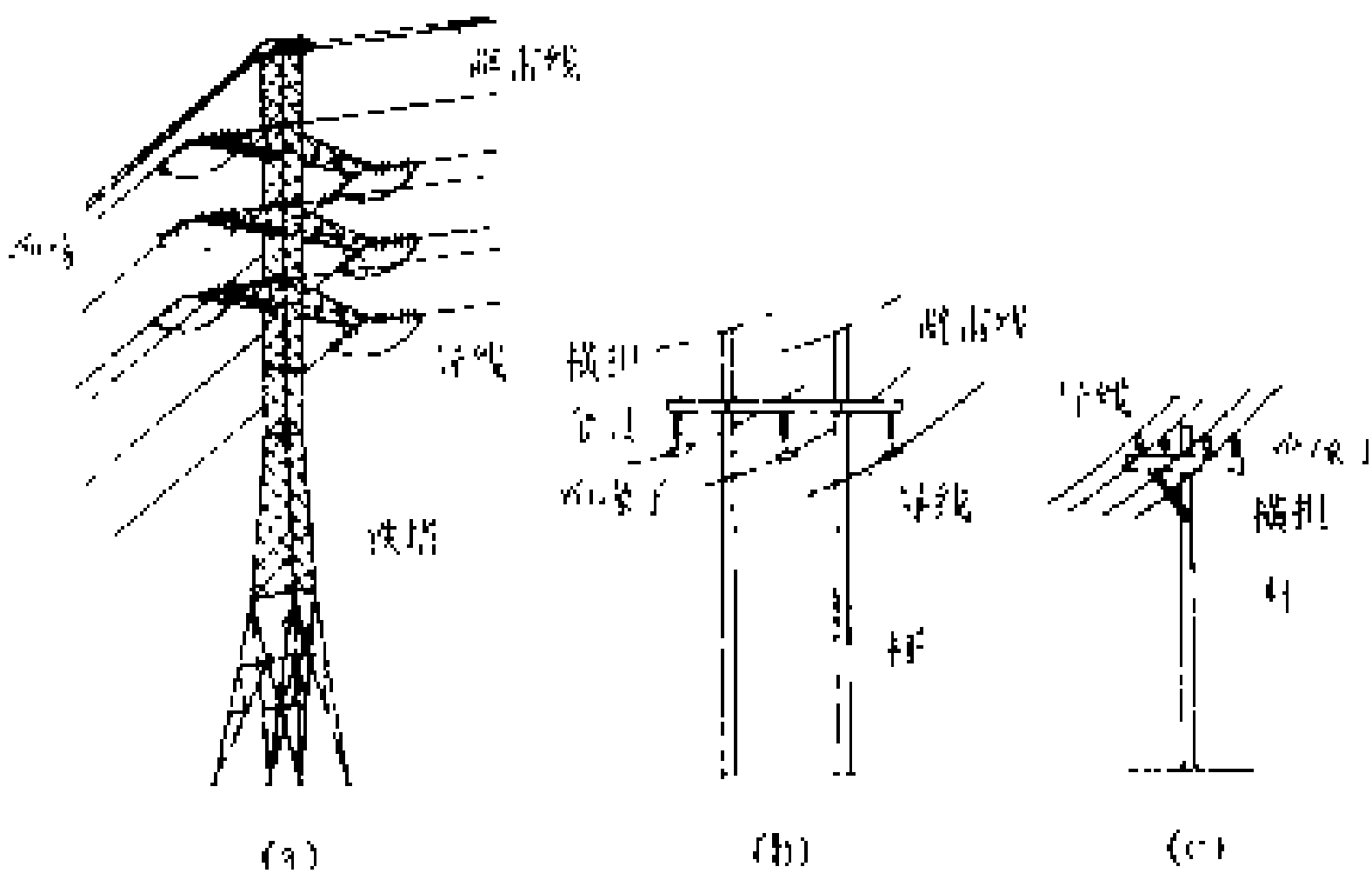


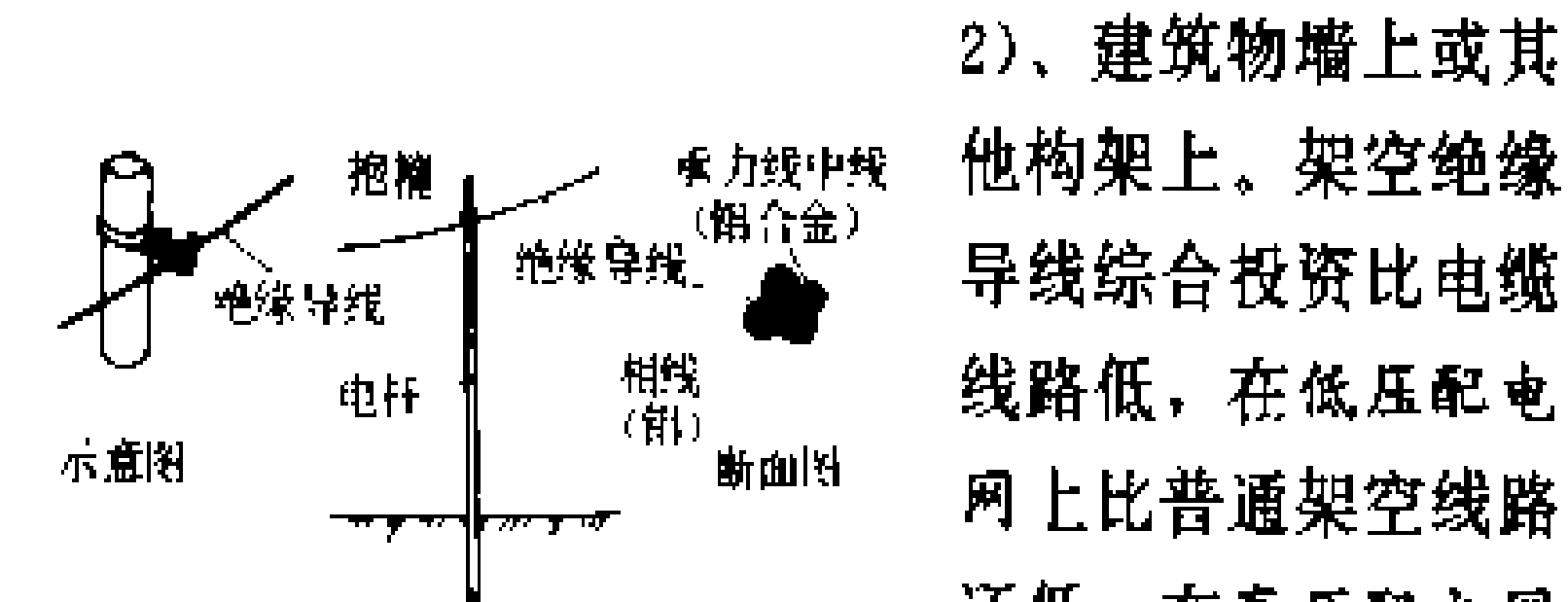
图1 架空配电线路杆塔示意图  
(a) 宽基耐张型铁塔; (b) 高压Ⅱ型电杆; (c) 三相四线制低压电杆

城市配电线路与农村配电线路 城市配电线路负荷重,重要性高,与农村配电线路相比,在结构与电气设计方面具有较大的安全裕度,并要考虑市容环境要求。城市配电线路的杆塔一般选用较高的钢筋混凝土杆、钢管杆、窄型铁塔,并以多回路同杆架设为主,即在同一杆上架设同电压或不同电压的线路以及路灯线和通信线等。农村配电线路的特点是用电负荷分散、线路长、导线截面较小,一般采用较低杆塔的单回路型式。

发展趋向 为了保证配电线路的安全运行,压缩

线路走廊,特别是解决配电线路与绿化树木的矛盾,从20世纪50年代中期开始试用架空绝缘导线或架空电缆。到60年代,架空绝缘导线已获得很大发展。目前许多国家对配电线路(特别是中、低压配电线路),已逐步采用以绝缘材料(交联聚乙烯、聚氯乙烯、聚乙烯等)做保护层的绝缘导线取代裸导线,形成了架空配电线路导线绝缘化的趋势。

绝缘导线可以分相布置在电杆横担的绝缘子或瓷横担上,亦可三相绞在一起挂在电杆的支架上(见图



2)、建筑物墙上或其他构架上。架空绝缘导线综合投资比电缆线路低,在低压配电网上比普通架空线路还低。在高压配电网中,由于绝缘费用较大,架空绝缘导线的综合投资比普通架空线路要高。但架空绝缘导线相间距离近,感抗小,对较长的中、低压配电线路,为了减少线路电压损失,采用普通架空线的导线截面一般要比采用绝缘导线的大,因而架空绝缘导线的投资相对可以降低。此外,小截面架空绝缘导线机械负载轻,技术上比较简单,投资更低,在农村的中、低压配电线路上应用更为合适。

在城市配电网中,配电线路短,导线截面大,回路数多,又有美化市容环境等要求,故城市特别是市中心区配电线路的发展趋向是逐步采用电缆。

(周德新)

天花板等。

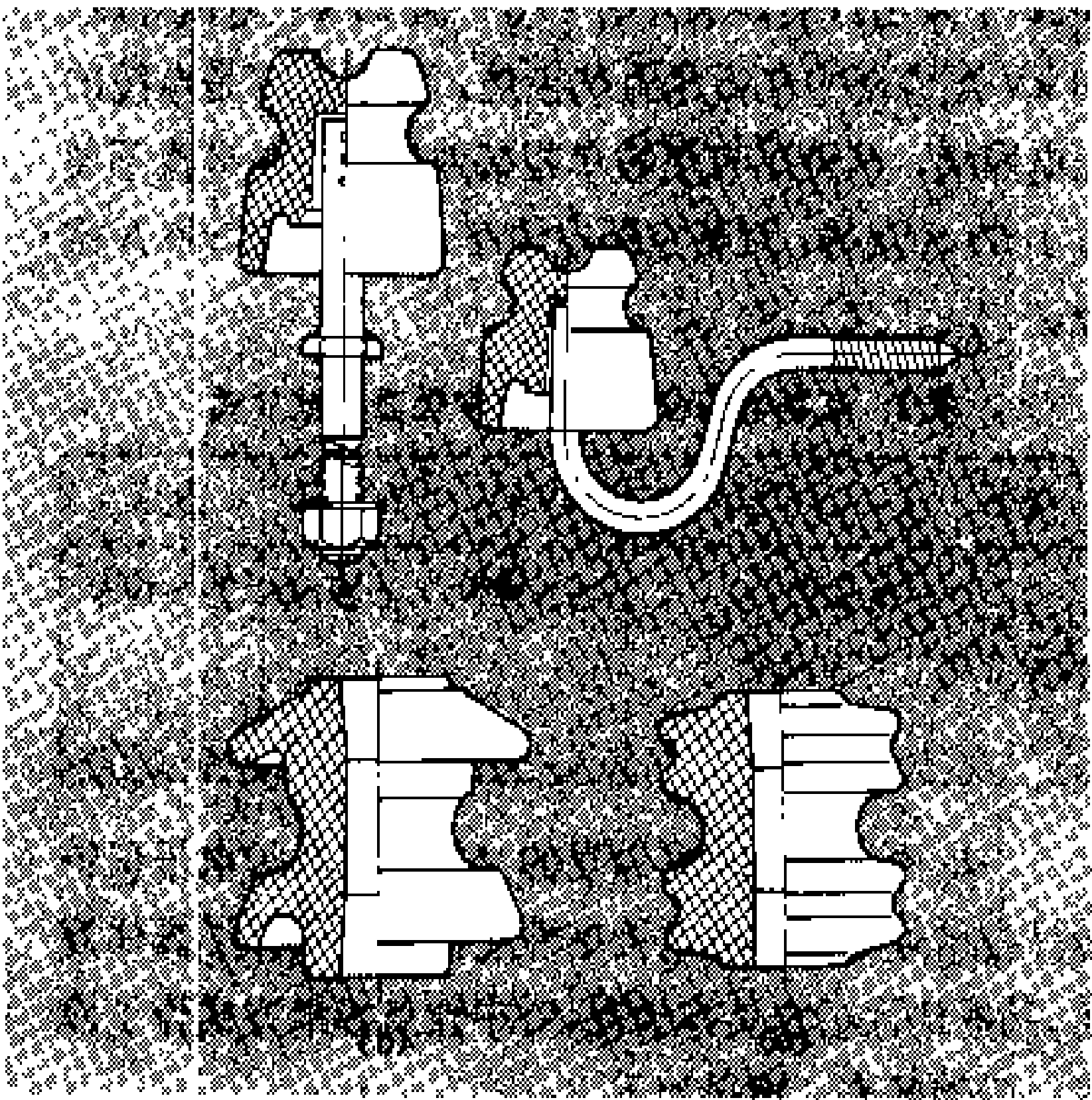


图1 低压架空配电线路绝缘子  
(a) 针式绝缘子; (b) 蝶式绝缘子; (c) 线轴式绝缘子

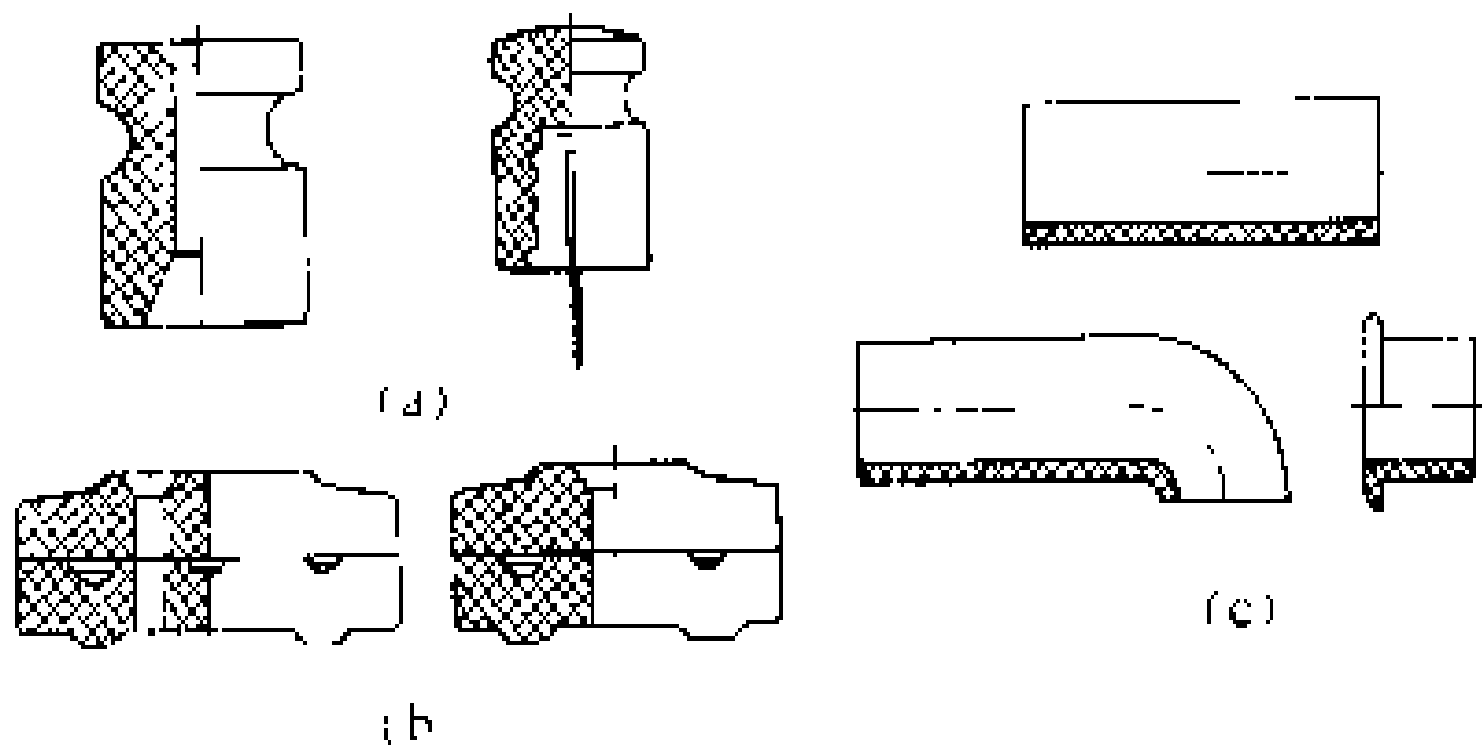


图2 低压布线用绝缘子  
(a) 鼓形绝缘子; (b) 瓷夹板; (c) 瓷管

peidian xianlu diya jueyuanzi

### 配电线路低压绝缘子 (low voltage insulators of distribution lines)

1000V 电压以下的配电线路绝缘支持物。起到固定导线和保持导体对地绝缘的作用。一般用电瓷材料做成一定形状后经过焙烧而成,具有一定的机械强度和电气绝缘强度。

分类 低压架空配电线路绝缘子包括针式、蝶式和线轴式三类,见图1。此外,还有低压布线用绝缘子。针式绝缘子带有钢脚,以便固定于各式横担或电杆上。钢脚型式又有固定于木横担的直脚、固定于铁横担的直脚和固定于木杆上的弯脚三种。蝶式绝缘子和线轴式绝缘子可用于线路终端、耐张及转角杆上。与相应的蝶式绝缘子比较,线轴式绝缘子的优点是机械强度高,结构简单,重量轻,成本低以及不易破碎等。

低压布线用绝缘子用于户内配电线路中,包括低压布线用鼓形绝缘子、低压布线用瓷夹板和低压布线用瓷管三类,见图2。鼓形绝缘子与瓷夹板用来固定导线并与墙体保持绝缘。瓷管用子导线穿过墙壁、楼板和

型号表示方法 中国低压绝缘子产品型号表示方法为:

PD-1T——低压线路针式绝缘子,数字为形状尺寸序数,“1”号为最大尺寸,T、M、W分别表示铁担直脚、木担直脚、弯脚;

ED-1——低压线路蝶式绝缘子,数字为形状尺寸序数,“1”号为最大尺寸;

EX-1——低压线路线轴式绝缘子,数字为形状尺寸序数,“1”号为最大尺寸;

G-25——鼓形绝缘子(GK表示胶浆木螺钉的鼓形绝缘子),数字为瓷件高度毫米数;

N-240-1——瓷夹板,中间数字的首位为槽数,后两位为瓷夹板长度毫米数,末尾数字“1”为上瓷板,“2”为下瓷板;

U-10-150——瓷管(UX表示弯头瓷管,UB表示包头瓷管,U表示直瓷管),中间数字为瓷管内径毫米数,末尾数字为瓷管长度毫米数。

中国低压架空配电线路绝缘子的试验标准和主要

尺寸应符合中国国家标准 GB1386《低压架空电力绝缘子》的各项规定。试验标准见下表。

中国低压架空配电线路绝缘子试验标准

型 号		PD-1T	PD-1M	PD-2T	PD-2M	PD-3W	ED-1	ED-2	ED-3	ED-4	EX-1	EX-2	EX-3	EX-4
瓷件机械破坏强度 (kgf)		600	800	500	500	500	1200	1000	800	500	1500	1200	1000	700
工频电压 (kV)	干闪	35	35	30	30	30	22	18	16	14	22	18	16	14
	湿闪	15	15	12	12	12	10	9	7	6	9	9	8	5

中国低压布线用绝缘子的主要尺寸应符合中国国家标准 GB1388《低压布线用绝缘子》的各项规定。

展望 国外在低压架空线路上普遍开始采用绝缘导线以代替裸导线,线路上所用低压绝缘子,也由一般的瓷产品改用耐候型绝缘玻璃纤维加强树脂,直接制成悬挂线夹或耐张线夹,代替一般的绝缘子和导线紧固金具,使线路结构更为紧凑,运行更趋安全。

参见彩图插页第 27 页 82 图。

(金辅夏)

peidian xianlu fanglei sheshi

**配电线路防雷设施** (protective facilities against lightning for distribution lines) 为使配电线路免受雷电危害或减轻雷电袭击的严重程度所使用的各种保护设备和装置。架空配电线路分布面广,暴露于大气中,易于遭受雷电袭击。因此,配电线路及线路上所安装的各种设备,如配电变压器、杆上开关设备、杆上电容器、电缆终端等,都必须装置防雷保护设备。此外,对于线路本身还可以适当提高冲击绝缘水平(见线路绝缘水平),例如使用木质绝缘横担,以降低因雷击引起的跳闸率。为使配电线路在雷击引起线路绝缘闪络发生跳闸后,迅速自动恢复供电,在变电所中采用自动重合闸,在线路上采用自动重合器、自动分段器、自动重合跌落式熔断器(简称重合熔丝)等装置,以提高供电可靠性。

**分类和功能** 配电线路的防雷设施按其功能的不同可分为如下四类:①防止直接雷击。如避雷针、避雷线。此类设施由接受雷电闪击的部件(如避雷针的接闪器、避雷线的架空金属线)和引下线、接地装置等三个部分组成,三部分之间是金属性连接的。②限制雷电过电压水平,使之低于被保护设备的冲击耐受强度,从而防止设备损坏。如阀式避雷器、管式避雷器、保护间隙。此类防雷设备装于被保护设备近旁,与被保护设备并接于带电导线(体)与大地之间。在泄放雷电流后,阀式避雷器、管式避雷器能自动切断工频续流或短路电流,但保护间隙一般不能切断放电后的短路电流,从而会引起线路断路器跳闸,因此保护间隙常与自动重合

装置配合使用。③提高线路绝缘水平。一般架空配电线路除采用瓷质绝缘子外,还采用木横担,利用其木质绝缘提高相间冲击绝缘强度。其作用不仅在于提高相间冲击闪络电压,同时还借助于瓷、木绝缘的综合作用,使得沿闪络途径的电位梯度低于维持电弧所需的最低梯度,从而使闪络后的工频短路电弧易于自行熄灭,防止线路断路器跳闸。④采用自动重合装置,提高供电可靠性。在线路发生闪络跳闸后,使断路器按照一定时间间隔自动重合,如重合不成功再次跳闸,还可以再次重合,甚至可以多次重合。由于雷击架空线路发生闪络引起跳闸后,故障点绝缘强度能够迅速恢复,因此在间隔很短的时间(几百毫秒至几秒)后,多数情况均可重合成功,继续供电。重合熔丝是一种装于线路上的跌落式自动重合熔断器,每相有两根熔丝管,上端并接,其中一根的下端经尾线连接至电气设备,另一根熔丝管正常时也处于合上位置,但其下端经过一个合闸机构的触头后连接至同一电气设备,此合闸机构触头正常时处在断开位置,不通电流。当第一根熔丝管动作跌落时,打击合闸机构上的曲柄,使合闸机构转动,合上第二根熔丝管合闸机构的触头,接通第二根熔丝管,从而恢复供电。

**应用** 配电线路防雷设施的应用方法如下:①避雷线用于 63~110 kV 电压等级的架空线路上,一般沿全线架设,安装于导线上方,用以保护导线免受直接雷击。用避雷线对外侧导线的保护角表示避雷线对线路的保护范围,保护角越小,则保护效果越好。对 63~110 kV 架空线路的避雷线保护角一般不大于 30°。避雷线须每杆接地,接地电阻值(工频)一般在 10~30 Ω 左右,根据具体情况,经过计算确定。对于电压低于 63 kV 的架空线,一般不安装避雷线,只有在特殊线段,例如变电所的进出线段,发电厂以发电机电压直接配电的出线段,才考虑装设 1~2 km 或数百米的避雷线,其目的主要是为了保护变电所内和发电厂内的设备。避雷针一般不用于配电线路,只有当发电厂以发电机电压直接向配电网供电,且在架空配电线路上难以按设计要求装设避雷线时,才采用独立避雷针保护近发电厂端的一段架空配电线路(其长度在数百米左

右)。避雷针的保护范围根据与被保护物的水平距离及避雷针顶端超出被保护物的高度(有效高度)在设计时经过计算确定。避雷针的接地电阻一般不超过  $10\ \Omega$ 。

②阀式避雷器、管式避雷器、保护间隙用以保护各种配电设备,由于它们具有不同特点,其具体用途也有所不同。如管式避雷器动作时将从排气端喷射出大量气体,保护间隙动作时产生短路电弧,所以只能安装于户外空旷场所。管式避雷器和保护间隙的保护特性比阀式避雷器差,不适宜保护有匝间绝缘的设备如变压器等。阀式避雷器主要用于保护变电所内的主变压器、母线上的配电装置和计量设备、架空线路上的配电变压器、杆上开关设备、电容器组、电缆终端等。管式避雷器主要用于线路交叉跨越段以及  $35\sim 110\text{ kV}$  配电变电所架空线路进线保护段首端和末端。保护间隙的应用和管式避雷器相似,但要与自动重合闸、重合熔丝等配合使用,以免造成大面积停电。阀式和管式避雷器、保护间隙的接地电阻一般在  $5\sim 10\ \Omega$  左右,须根据具体情况确定。

③木横担可以在各种电压的架空线路上使用。木横担在运行中,由于导线对地和各相导线之间的泄漏电流影响,可能出现木质燃烧现象,必须采取措施并加强运行维护工作。在一些地区,木横担已被瓷横担或合成绝缘子所代替。

④自动重合闸、重合熔丝已在配电网中大量采用。配电变电所的架空出线断路器都可采用自动重合装置,电缆出线断路器,在  $35\text{ kV}$  以下的配电网中也有采用自动重合装置的。重合熔丝主要用于电压在  $10\text{ kV}$  及以下的架空线路支线上和部分杆上变压器的高压侧。

**展望** 以氧化锌为主要阀片原料的金属氧化物避雷器(又名氧化锌避雷器)的出现和发展,在各级电压系统中逐步替代了以碳化硅为主要阀片原料的阀式避雷器。这不仅是由于氧化锌阀片具有优异的非线性特性、更大的热容量,在相同雷电流通过时有更低的残压,还在于它可以设计成无串联间隙的避雷器,使其保护特性更为优越。架空线路上自动重合器、自动分段器的进一步推广应用,使较长配电线路和分支较多的配电线路的供电可靠性得以显著提高,有利于提高农村配电网的运行水平。

见避雷器、保护间隙、避雷针、避雷线、自动重合器、自动分段器。

#### 参考书目

解广润主编. 过电压及保护, 第2版. 北京: 电力工业出版社, 1980

(王一字)

peidian xianlu yunxing jianxiu

**配电线路运行检修** (operation and main-

tenance of distribution line) 保证配电线路在规定的电压质量和线路损失率的条件下,按原设计容量不间断地供电所采取的技术措施。配电线路的运行与检修不可分割。中国现阶段的主要措施内容包括巡视、预防性试验、检修、事故处理、建立完整的技术资料五个方面。

**巡视** 沿配电线路定期或不定期的用肉眼或望远镜对配电线路的各元件包括周围环境的检查。配电线路分布在整个供电区域内,易受自然条件和人为因素影响,必须对线路及其附属设施进行巡视。按巡视目的和性质不同,一般分为专职人员巡视、监察性巡视、故障巡视三种。

(1) 专职人员巡视。目的是掌握线路运行状况以及周围环境尤其是防护区内的情况,及时发现问题,预防事故的发生,并提出需要检修的具体内容。按巡视内容和目的不同又可分为定期巡视、特殊巡视、夜间巡视等三种。定期巡视需按当地电业部门规程规定周期进行,除检查杆塔、拉线、导线、绝缘子(包括金具和横担)、防雷设施、接地装置、沿线情况等主要共同项目外,高压架空配电线路要注意塔材、拉线、接地装置等有无丢失,沿线地形地貌有无变化,并与当地基层政府和居民取得密切配合。中压架空配电线路要增加检查配电变压器、杆上开关设备、跌落式熔断器等项目,并注意邻近建筑物和道路的拆修改建情况。低压架空配电线路要增加检查接户线和中性线重复接地等,并注意用户的迁移变动。特殊巡视在气候恶劣或剧变时进行。夜间巡视重点是检查导线、导线连接处的发热和污秽地区绝缘子的放电情况。

(2) 监察性巡视是领导和技术人员为了解线路运行状况和专职巡线人员工作情况的一项措施。

(3) 故障巡视是配电线路发生事故时,为查明事故原因和尽快消除故障所进行的特殊巡视,是事故处理的一个步骤。

**预防性试验** 在配电线路正常运行时,采用专用仪器仪表对配电线路进行测试,以便及时测定运行数据,发现缺陷部件或设备的一种技术措施。它与巡视工作相辅相成,主要内容为:①带电用火花间隙测试杆检查出不良绝缘子;②带电用蜡片、带电或停电用电桥、不接触带电体用红外线测温仪等方法测试导线接头温度;③带电用绝缘绳或不接触带电体用经纬仪测量导线弧垂、对地距离和交叉跨越距离;④用接地电阻测定仪测试接地电阻和土壤电阻率;⑤配电变压器带电测电流、电压、三相电流不平衡度;⑥停电用摇表测试配电变压器、杆上隔离开关、杆上开关设备、绝缘子等的绝缘电阻,但针式绝缘子也可定期轮换拆送试验单位试验;⑦配电变压器的工频耐压、匝间绝缘试验(倍频

率或操作波),根据具体情况可在现场或在试验室进行。

**检修** 在保持线路原设计条件下进行必要的维修工作,也包括部分合理改进工作,例如增大部分导线截面,变更部分线路走向等。分不接触带电体检修、停电检修、带电检修三种。

**不接触带电体检修** 检修对象在正常运行时均不带电,并与带电体保持一定安全距离的检修工作。不接触带电体检修不需要停电,但要注意确保与带电体的安全距离。其项目有杆根、基础、拉线根部、防洪设备、防冻措施等的检查与修理,增加或更换帮柱,铁塔下部紧螺栓、刷油,混凝土杆钢圈涂防腐剂,书写或刷印杆塔编号,修剪线路沿线树木等。

**停电检修** 检修对象在正常运行时带电但在检修前已经停电的检修工作。重点为消除各种缺陷和薄弱环节,也可以结合进行一些改进或业扩工程。配电线路停电检修应与输电线路检修互相配合,以减少停电次数和时间。

**带电检修** 检修对象在正常运行和检修时都带电的检修工作,分等电位直接作业、地电位间接作业、中间电位作业三种。进行带电作业必须由经过特殊训练的专门人员按专用规程操作。由于环氧树脂、尼龙等优质轻便绝缘材料和绝缘斗臂车的出现,使得带电作业范围更加扩展。中国已推广的配电线路带电作业项目有:更换耐张、直线绝缘子串,悬式、针式、蝶式绝缘子和瓷横担,横担,直线杆,跌落式熔断器;断、接引流线;补修导线等。此外,带电作业还广泛用于装设配电变压器引下线,以加快对新用户的供电。(见输电线路带电作业)

**事故处理** 主要任务有:①查明事故原因,尽快加以消除;②保证能供电的线路继续供电;③尽快恢复故障线路供电。高、中压配电线路发生事故后,要分清是接地故障、相间短路、重合成功与否,正确判断故障性质和区段,然后组织人员进行紧急故障巡视,查明故障点,并在最短时间内消除故障。低压配电线路要分清是配电变压器一次侧熔丝熔断,一、二次侧熔丝同时熔断,二次侧熔丝或二次侧分路熔丝熔断等不同情况,以便正确加快处理。查明故障点后,要对现场情况详细记录,必要时还需拍照、摄像,以便分析统计,制定防止措施。

**技术资料** 包括线路名称、杆塔编号、规程、记录簿、图表、资料等。

**线路名称、杆塔编号** 它是保证安全生产,提高劳动生产率,以及为进一步推行现代化管理的基础工作。线路编号要注意有利于计算机输入的编码程序。

**规程** 包括有关现行安全工作规程,线路防护规程,设计技术规程,安装检修工艺规程,运行规程等。

非现行规程要单独放置。

**记录簿** 主要有巡视、登杆检查设备缺陷记录簿,各种预防性试验记录簿,检修记录簿,固定资产记录簿,用户用电设备、最大负荷记录簿等。

**图表** 图主要有平面布置图,高、中压配电线路条图,低压配电线路台区图,图中配电线路要以地形图为基础绘制,以便查核使用。表主要有巡视计划及实施进度表,大修改进工程计划及实施进度表,事故统计表,低压事故故障分类统计表。

**资料** 主要是制造厂的安装、运行说明书,设计施工单位的设计、施工、竣工图,隐蔽工程和测试记录,国内外有关技术资料等。

**展望** 配电线路运行检修工作是配电网经营管理的一项重要内容。在中国,今后的发展趋势是:提高设备制造和原材料的质量,提高线路设计和施工质量,做到少检修甚至不检修,同时发展带电作业以减少停电,保证供电的连续性,并利用电子计算机参加管理,提高事故处理、资料管理等的效率。

(纪瑞明)

peidian zhuangzhi

**配电装置** (switchgear arrangement) 在发电厂和变电所中,由各种电气设备组合而成的进行电力传输和再分配的电气设施。配电装置通常包括断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、耦合电容器、阻波器和绝缘子等电气设备,它们按照电气主接线的要求,通过母线和连接线相互连接,可布置成多种型式,并可放置在屋外、屋内、金属柜或内部充以 SF<sub>6</sub> 气体的全封闭金属外壳中。

**布置型式** 从 6 kV 到 500 kV 配电装置的布置型式有:①屋外布置有低型、中型、半高型和高型等;②屋内布置有单层、两层和三层等;③装配在金属柜内的成套配电装置和气体绝缘金属封闭电器可以布置在屋外或屋内。配电装置的布置型式按当地的环境条件、地形地貌、设备型式、电气总体布置和进线出线方式等因素择优确定。通常 6~10 kV 配电装置采用屋内布置,而且多数采用成套配电装置。35 kV 配电装置、污秽较严重地区或市区内的 110 kV 配电装置通常也采用屋内布置,在这些条件下有时 220 kV 配电装置也采用屋内布置。在大城市中心地区或环境条件十分恶劣的地区,110 kV 和 220 kV 配电装置有时采用气体绝缘金属封闭电器。在要求节约用地和少占农田的地区,110 kV 配电装置通常采用半高型布置,220 kV 配电装置则通常采用高型布置。在地震基本烈度为 8 度及以上的地区和土地贫瘠的地区,110 kV 和 220 kV 配电装置则采用屋外中型布置。330 kV 及以上的配电装置通



常采用屋外中型布置，少数采用气体绝缘金属封闭电器。电气设备全部落地布置在它周围加设围栏的屋外低型布置很少采用，有时只有个别电气设备采用低型布置。

配电装置在电气总体布置中的位置要符合发电厂和变电所的规划以及布置的整体协调，符合进线出线方向和线路走廊的要求，避免线路架空线交叉。

**布置要求** 配电装置中电气设备之间有足够的电气安全净距，以保证电气设备在一定的风速作用下能经受住雷电过电压、操作过电压和工频过电压的冲击。电气设备有足够的机械强度，在短路电流的冲击下，其动稳定和热稳定不致受到破坏。在布置上有防火、防爆和蓄油、排油措施。电气设备具有一定的防冻、防风、防潮、抗震和耐污秽性能。控制配电装置中的噪声和无线电干扰水平，以减少对周围环境的污染。在布置上有足够的空间和清晰度，以便于安装、检修和巡视维护。在总体布置上便于配电装置的分期过渡、扩建发展、并有利于节约用地、节省材料和降低工程造价等。在电气设备之间设置闭锁装置，以防止发生带负荷开合隔离开关、断路器带接地合闸、带电挂接地线、误开合断路器、误入屋内带电间隔等电气误操作事故。

**特殊地区的布置要求** 在地震区，降低电气设备的安装高度，加固设备的支架和基础，用软母线连接而不采用硬母线连接，用屋外配电装置而不用屋内配电装置等。在高海拔地区，加强电气设备的外绝缘，增大空气安全净距，采用性能良好的避雷器等。在污秽地区，增大外绝缘的爬电比距，远离污秽源，加强停电清扫或带电水冲洗，采用防污涂料，采用屋内配电装置布置或气体绝缘金属封闭电器等。

**发展概况** 随着输电电压的提高，配电装置的电压也在提高。1952年瑞典最早建成了380 kV配电装置，1959年苏联建成了500 kV配电装置，1965年加拿大建成735 kV配电装置。中国于1972年在西北地区建成了330 kV配电装置，1981年在华中地区建成了500 kV配电装置。各国在35 kV及以下的配电装置中，均有由装配式向成套式配电装置的发展趋向。在220 kV及以上的配电装置中，六氟化硫断路器和气体绝缘金属封闭电器的采用也逐渐增多。

参见彩图插页第12页37图。

**参考书目**  
西北电力设计院编，发电厂变电所电气接线和布置，北京：水利电力出版社，1984  
(戈东方)

peidian zidonghua  
**配电自动化** (distribution automation)

以实时方式就地或远方对配电网进行数据收集、控制、调节和事故处理的技术。其目的在于保证配电网安全经济运行，改善电压质量，降低电能损耗，快速处理事故，提高供电可靠性。配电自动化包括变电所中的继电保护、当地自动化装置、调度中心至变电所的监控和数据收集系统、配电线自动化、用户自动化等内容。

**发展概况** 20世纪50年代以前，配电网变电所中除继电保护装置外，设备的运行、操作和控制均由运行人员或值班人员人工执行。以后逐步发展了一些当地自动化装置，如重合闸开关、自动控制的变压器调压、电力电容器自动投切、按频率减负荷和母线负荷自动切换等。但设备的监视和抄表等运行工作仍由人工执行。50年代后期开始，曾先后采用过通用电钟式和简易数字式远动装置，实现由调度中心通过远动通道以召唤方式对远方变电所进行遥信、遥测和遥控。70年代后期，计算机技术飞速发展。目前，以计算机为基础的监控和数据收集系统(SCADA系统)已在配电网调度自动化中普遍应用。同时，自动化进一步推向配电线和用户，使配电自动化的功能和覆盖范围更为全面。

**配电网的继电保护装置** 配电网中最基本和最主要的自动化设施是继电保护装置，主要配置于变电所的断路器上，其功能为：当配电网中的配电线、变压器和其他设备发生短路故障或异常情况时，能有选择性地快速将故障设备从电网中隔离，以减轻设备损坏程度和尽量少影响正常供电。

配电网继电保护装置配置的原则是：①110 kV线路一般在电源端装设多段式相间电流、电压及零序电流保护，当电流、电压不能满足要求时，则装设距离保护或纵差保护。②10~35 kV线路一般在电源侧装多段电流保护，并列运行的线路根据计算装设横差或纵差保护。在中性点有效接地系统中，还要装设接地保护；在中性点非有效接地系统中，还要装设指示接地故障线路的继电保护装置。③大型的电力变压器要装设差动保护、瓦斯保护和电流保护；采用不设进线断路器的线路变压器组接线时，还要装设远方跳闸装置，使差动、瓦斯等内部故障保护能动作上一级断路器。④配电变压器和低压配电网可用熔断器作为过电流保护。设计主要设备的继电保护系统时，还要考虑主保护失灵时的后备保护。

**监控和数据收集系统** 以计算机为基础，采用数字编码以扫描方式进行信息传送和接收，实现调度中心对多个远方变电所的连续监视、遥控和数据收集的系统，又称调度自动化系统，简称SCADA系统。其结构框图如图1所示。

图中只画出一个远方变电所，其他的均相同。配电

网的调度自动化功能一般有报警、遥控、数据收集、记录和显示等。

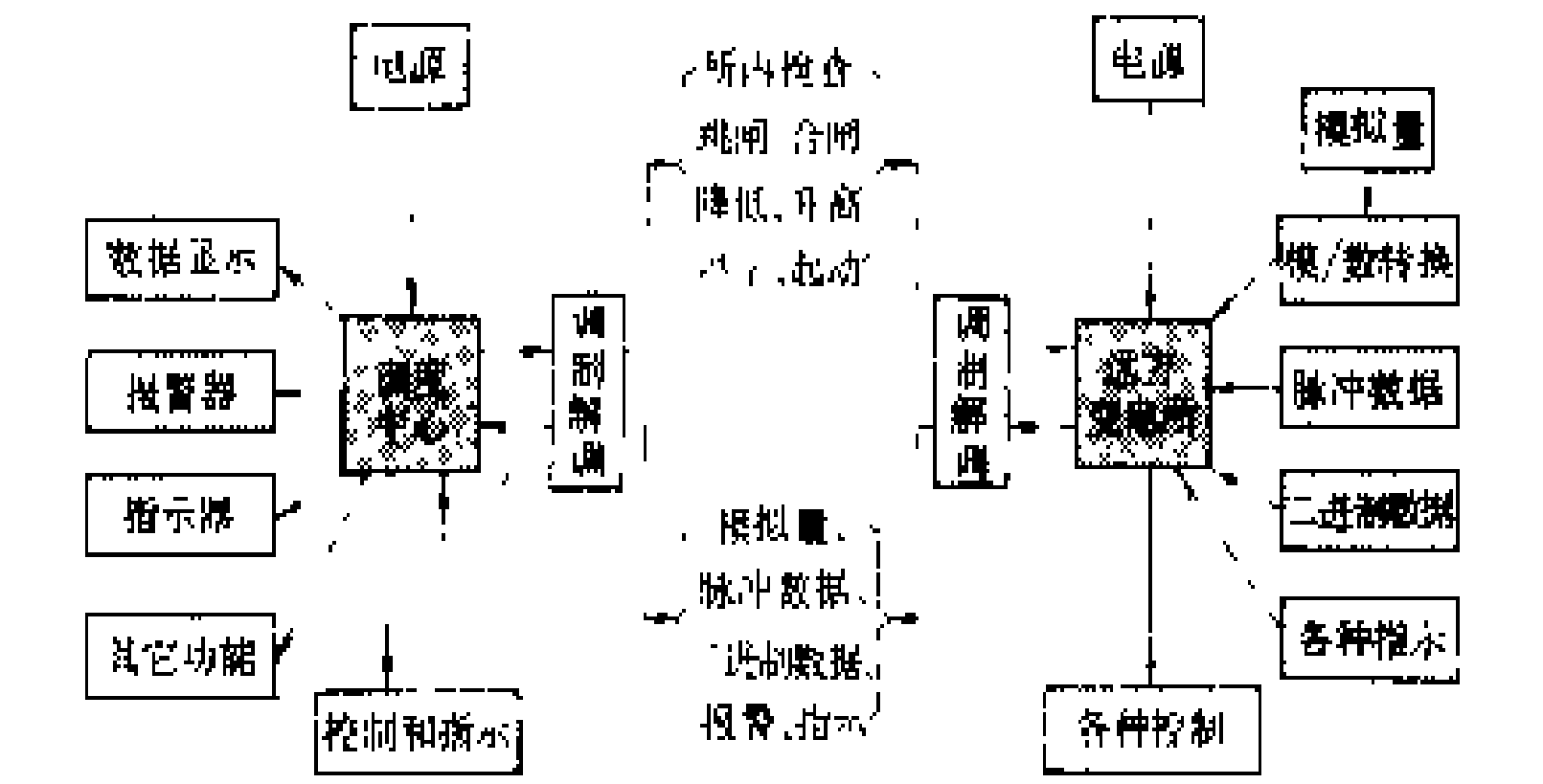


图 1 监控和数据收集系统 (SCADA 系统)

- (1) 报警。包括火警、非法闯入、设备过负荷、运行温度过高、蓄电池电压过低和断路器变位等。
- (2) 遥控。主要为断路器的合闸或跳闸，但对其他就地控制的设备，必要时也可转由调度中心遥控。
- (3) 数据收集、记录和显示。包括模拟量如电压、电流、有功功率、无功功率等，数字脉冲量如电能和数字数据如油位等。

调度自动化的范围只涉及变电所中的设备，变电所外的配电线则由配电线自动化承担。

配电线自动化 当配电线故障时，配电线上的自动化装置代替运行人员实行各种操作，将故障隔离和恢复供电。实现配电线自动化，须将全线用自动分段开关分成几段，并配置相应的控制装置。当线路电压消失或被检测到失压时，自动开关能按要求对此作出反应。在辐射形供电情况下能隔离故障，恢复供电，在双侧电源供电情况下能重新安排配电线布局。

(1) 辐射形架空线路：其自动化布置如图 2 所示。

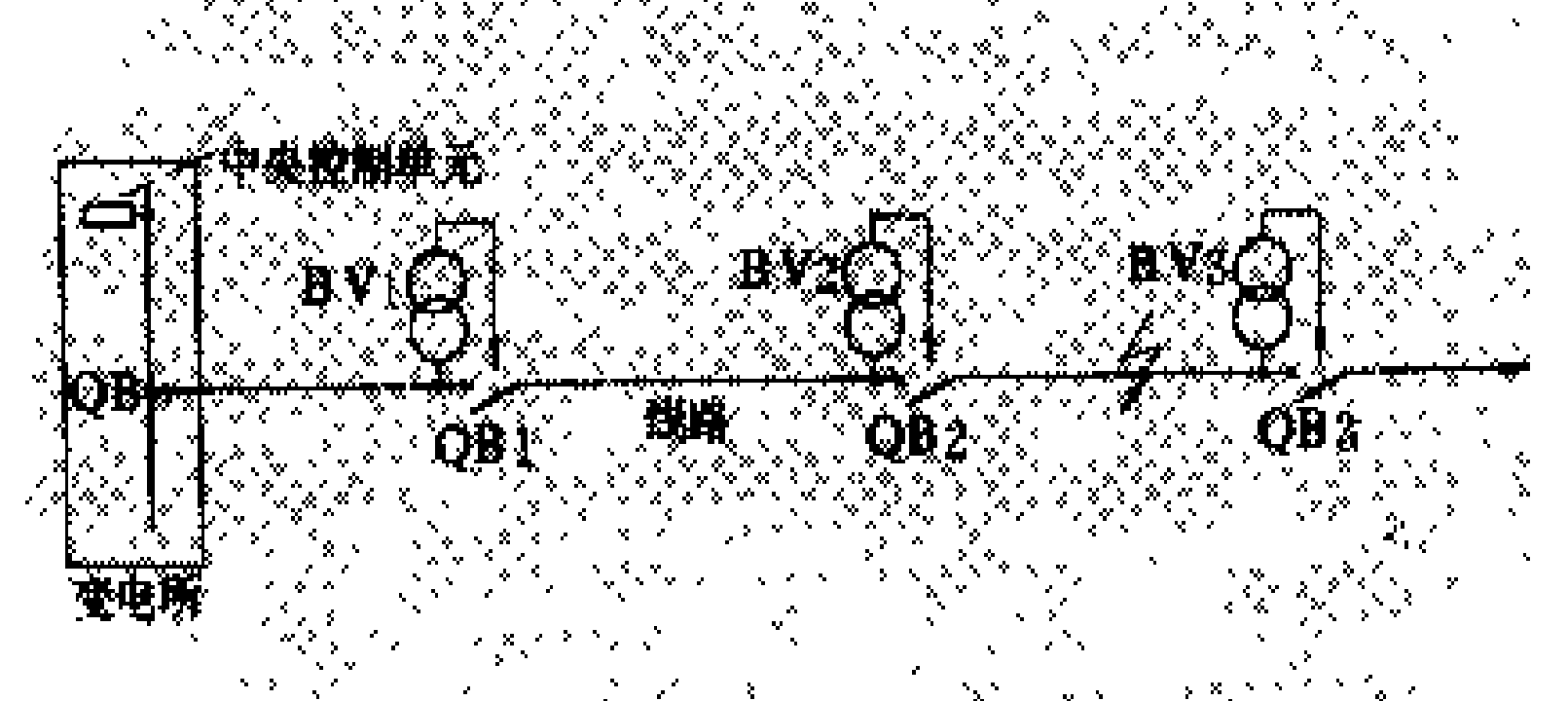


图 2 辐射形架空线路自动化布置

图中 QB1、QB2、QB3 为带就地控制装置的重合断路器，BV1、BV2、BV3 为线路电压传感系统。QB2 后的故障先使断路器 QB 跳闸，并快速重合；若故障仍然存在，QB 第二次跳闸。此后由中央和就地控制装置按预先置定的顺序动作有关开关设备：①QB1、QB2、QB3 全部跳闸。②QB 于第 20s 后合闸。③QB1 感知线路重新带电后，由就地控制装置动作于第 40 s 后合闸。④同理，QB2 于第 60 s 后合闸，因合于故障，QB 再跳闸，

并保持在跳闸位置至第 80 s。失电后，QB1 和 QB2 跳闸并将 QB2 闭锁，隔离故障。⑤QB 于第 80 s 后合闸。⑥QB1 感知有电后于第 100 s 合闸，事故操作完毕。全过程不到 2 min，大大快于人工处理。

(2) 双侧电源架空线路：其自动化布置如图 3 所示。图中 QB1、QB2 为断路器，QB3、QB4 为带逻辑和计时电路的杆架重合断路器，BV3、BV4 为线路电压传感系统，它是一电阻分压器，通过光电转换，用光纤将电压有无信号输入到断路器的逻辑电路。当故障发生在 B 段时，QB3 起一般重合闸断路器的作用。若故障发生在 A 段，QB1 跳闸，重合不成后闭锁，A 段和 B 段均失去电源。在这种情况下，QB3 和 QB4 都感知到失去电压，当地逻辑电路就起动一计时器，经一定的时延后使分段开关改变其位置，即 QB3 先打开，然后 QB4 合闸恢复 B 段线路的供电。

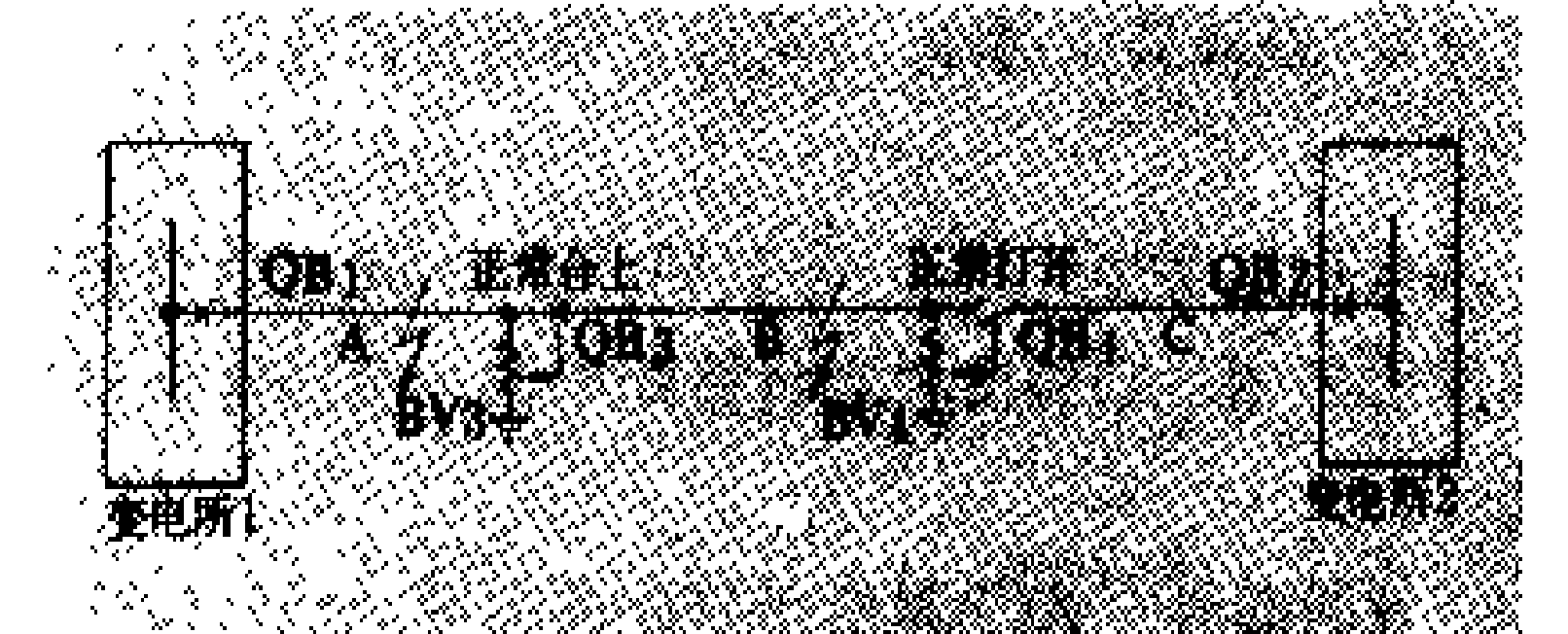


图 3 双侧电源架空线路自动化布置

(3) 双侧电源电缆线路：双侧电源的电缆线路一般采用以环网供电装置分段的单环网开环运行，装置上有连接进线和出线

电缆的二台断路器，在断路器上加装用蓄电池驱动的操作机构，以及在变电所和环网装置上配置故障遥示和控制系统后，就可实现自动化。图 4 图 4 10 kV 电缆环网开环运行

是一个中性点有效接地系统的电缆环网自动化布置示意图。接地故障电流检测和发信装置由二个铁芯分开的零序换流器和一个封装的检测发信器组成。当这些控制装置感知电源端断路器跳闸及故障电流消失后，即起动一计时器，经过预先整定的时间后，储能电容器上剩余的电能使电子器件中的振荡器和放大器工作，产生的载波信号由电力电缆送到变电所的中央控制器。中央控制器接收到各处信号的时差，判定故障的区段，再按预编的操作顺序，发令环网开关动作，隔离故障，恢复供电。对中性点不接地的配电网，则采用另一种故障电流检测器。若双侧电源是来自不同的变电所，则须通过 SCADA 系统处理。

用户自动化 指用电管理自动化，主要包括自动

读表和负荷控制。对一般用户,各国已有先付费后用电的预算电度表(Budget meter)。付费方式是将流通的硬币投入电度表,或将充过磁的磁卡上的信息输入电度表,然后按输入的信息用电。磁卡可多次充入信息,各营业部门设有充磁机,收费充磁。还有为实现分时电价的分时电度表,其计数器可按预编程序自动切换,或由营业部门用音频脉冲或无线电进行切换。用于大用户的自动读表系统,是用智能电度表或将传统电度表的计量转换成脉冲存储于记录器中,由营业部门利用电话线作为通道按预编程序由计算机系统接收和处理,输出电度数、最高需量和其他需要的数据。至于电费帐单的打印、付款后的销根、欠费的警告和最终断电通知等,均可由计算机网络处理,从而节省大量人力并避免差错。

负荷控制指控制用户的部分负荷如热水器、中央空调等,以提高负荷率。可利用自动读表系统兼作负荷控制。

用户自动化的内容、方式和综合化,还在继续完善和发展之中,它的出现必将使配电进一步接近全自动化。

发展趋势 由于微电子技术的突破,已可能开发一种具有综合控制、保护和监视功能的数字化开关控制单元,把全部硬件及部件集中在一起,并配以充分的软件。这些软件可承担控制、连锁、继电保护、设备诊断、记忆、就地显示以及必要时与上一级控制系统通信等多方面任务。在这种控制单元中,因输入信号采用了数字技术,对同样运行值,传感器可大大缩小尺寸,因此特别适用于少占空间的中压组合式开关设备。此外,还有将 SCADA 系统与电网信息系统和负荷管理系统用实时数据通道联接起来的趋势,以提供一些新的功能,如实现配电网的实时调度以实时控制电网负荷潮流达到最佳运行,通过专家系统的开发进行故障定位和重新安排系统布局等。同时,实时联系的综合系统也可可为电网规划、设备管理等工作服务。

配电自动化提供的功能具有重大的实际意义,但大规模采用尚受到投资费用的限制。在所涉及的技术问题都能解决的情况下,开发一些具有简单、可靠、价廉且可供实际采用的产品,是当前的重点所在。

#### 参考书目

GEC. Electric Utility Systems and Practices. New York: John Wiley & Sons, 1983

(屠三益)

pingbo diankangqi

平波电抗器 (smoothing reactor) 串接在换流站的直流侧与直流线路间的电抗器,又称直流

电抗器。主要起抑制直流线路电流和电压脉动的作用。平波电抗器在直流输电系统中的作用还有:①当直流线路短路或逆变器发生换相失败故障时,抑制故障电流上升率并降低故障电流,减少连续换相失败的几率;②抑制直流侧的脉动分量或降低直流侧的谐波分量,减小对邻近音频信道的干扰,改善电磁环境;③当直流电流很小时,减少直流电流中断的几率,从而减少由此产生的过电压的几率;④抑制线路和换流站其它设备的电容通过逆变器旁路的放电电流;⑤削弱由直流线路侵入换流站的过电压波的陡度和幅值。平波电抗器的电感值,一般由抑制直流侧脉动的要求和直流电流最小值(一般选为直流断续电流的2倍)的要求,经计算分析而确定。在已建的直流工程中,平波电抗器的电感值为0.4~1.5 H。

结构 平波电抗器按绝缘和冷却方式的不同,有油浸式和干式两种,按磁路结构不同有空芯式和铁芯式两种。空芯电抗器的电感值基本是线性的,而铁芯电抗器则有较大的非线性度,在小电流时电感值较大,可减少直流电流中断的可能性。为了避免直流套管在雨天由于不均匀湿闪而造成故障,一般油浸式铁芯电抗器的阀侧套管均伸进阀厅内。

设置和接线 平波电抗器的设置和接线方式有多种。①一般方式是将平波电抗器串接在一个极中,处于高电位;②T接法是将平波电抗器分为两半,中间接有直流滤波器,以增强抑制谐波的作用,两个电抗器都设置在高电位;③将电感分做成一小一大的两部分,分别串接设置在极上和换流器中性点部位的引出线上,分处于高、低电位;④在直流输电线路是电缆线路的情况下,全部电感可设置在中性点部位。

试验 对平波电抗器应进行的主要试验有:①线圈冷态直流电阻测量;②损耗测量,包括直流损耗、谐波损耗、铁芯损耗和平波电抗器冷却所需的功率之和;③电感值及其非线性的测量;④介质试验,项目基本与换流变压器的相同。油浸式平波电抗器还要进行铁芯绝缘试验、绝缘介质损耗与电容测量、套管试验、辅助装置试验等。

参见彩图插页第35页109图。

#### 参考书目

戴熙杰主编. 直流输电基础. 北京: 水利电力出版社, 1990

(沈赞坝)

Pingdingshan - Wuchang shudian xianlu

平顶山—武昌输电线路 (Pingdingshan - Wuchang transmission line) 中国首批500 kV超高压输电线路工程项目之一,简称平武线。该线



路从河南省平顶山市姚孟发电厂引出，经湖北省荆门市双河变电所至武昌凤凰山变电所，全长 595 km，单回路。设计输送容量为 1000 MW。

全线共有铁塔 1514 基，直线塔的主要塔型是拉线 V 型塔、内拉线门型塔和酒杯型塔。拉线 V 型塔主柱大都采用预制薄壳基础。双凤段（双河变电所至凤凰山变电所）在武昌县金口跨越长江，跨越档距 1165.7 m，跨越塔高 135 m；在钟祥县中山口跨越汉水，跨越档距 1055 m，跨越塔高 120 m。两处跨越塔均为钢筋混凝土烟囱式结构，跨越档为双回路，钢管横担，导线为三角形排列。

该线路导线采用每相四分裂 LGJQ-300 轻型钢芯铝绞线，分裂间距为 45 cm，单绞式间隔棒，次档距（见分裂导线）为 60 m。跨越档采用每相三分裂 LHGJT-440 特强型钢芯铝合金绞线，分裂间距为 80 cm，用防振锤和阻尼线作防振保护。

该线路操作过电压水平按 2.5 倍相电压设计。在姚双段（姚孟发电厂至双河变电所）两侧和双凤段的双河侧都装设并联电抗器，其中性点经小电抗接地，以降低潜供电流值。直线塔悬垂绝缘子串用串联 28 片 XP-16 型瓷绝缘子，在污秽地区用 28 片 XP3-16 型大爬距瓷绝缘子串；耐张塔采用双串 28 片 XP-21 型瓷绝缘子；大跨越塔采用 6 串组合 30 片 XP-21 型瓷绝缘子。

该线路的架空地线采用 LHGJJ-90 加强型钢芯铝合金绞线，其零序阻抗比镀锌钢绞线低，有利于限制工频过电压。大跨越档用 LHGJT-150 型钢芯铝合金绞线。两根架空地线均用 XDP-7C 型绝缘子隔离，其中一根用于地线载波通信。为了降低架空地线上的感应电压，每隔 10~20 km，架空地线在耐张塔上换位一次。

该线路施工中采用了张力架线工艺（见架线施工）。线路造价 20.5 万元/km，导线 13.5 t/km，架空地线 1.20 t/km，钢材 22.16 t/km，金具 0.88 t/km，绝缘子 281 片/km，水泥 22.1 t/km。全线于 1981 年 12 月投入运行。

参见彩图插页第 3 页 9 图。

（胡维新）

pingbixing dianlan

**屏蔽型电缆**（screened type cable；H-type cable）一种带有金属屏蔽的粘性浸渍纸绝缘电缆。在每个绝缘线芯外用一层打孔的金属化纸或用铝箔或铜带间隙式绕包形成金属屏蔽，然后将三个带金属屏蔽的绝缘线芯绞合成缆，填充成圆形后用铜丝编织的纤维带扎紧，再挤压金属套。屏蔽型电缆的截面结构如图所示。屏蔽型电缆早期用在 20~35 kV 电力电

缆线路中。

在屏蔽型电缆中，由于绝缘线芯的金属层通过绑扎的铜丝编织带与金属套有良好电气接触，使屏蔽层和金属套能处于相同的地电位，使绝缘层中电场的电力线方向形成沿线芯半径方向分布，均垂直于纸带表面，消除了沿纸带表面的分量，提高了绝缘的电气性能，而且填料不受电场的作用。屏蔽型电缆与带绝缘电缆相比，可用于较高的电压等级。屏蔽型电缆的导体，早期为圆形结构，后改进为椭圆形结构，这并不改变屏蔽型电缆的特性，但可减小外径。



屏蔽型电缆截面结构

1—导线；2—导线屏蔽；3—相绝缘纸；4—相绝缘屏蔽；5—铜丝编织纤维带；6—铅套；7—内垫层；8—钢带铠装；9—外护层

屏蔽型电缆是 1914 年由德国工程师 M. 霍赫施泰德（M. Höchstädter）发明的，故又称 H 型电缆。屏蔽型电缆比分铅型电缆的外径小，并可制成裸铅套结构，易于敷设在排管中，在美国用得较多。但在 20 世纪 60 年代固体挤压聚合电缆发展后，屏蔽型电缆与其他纸绝缘电缆一样，逐渐被淘汰。

参考书目

刘子玉．电气绝缘结构设计原理．北京：机械工业出版社，1981  
Barnes C C. Power Cables: Their design and installation. London: Chapman & Hall Ltd, 1953

（桑纪明）

putong fashi bileiqi

**普通阀式避雷器**（ordinary valve type surge arrester）由碳化硅阀片和普通平板间隙串联组成的阀式避雷器。普通阀式避雷器一般只用来限制雷电过电压，不能用来保护旋转电机。

普通阀式避雷器所用的碳化硅阀片是由金刚砂和结合剂在 500℃ 下烧结而成的圆饼，其非线性系数  $\alpha$  在 0.2 左右。避雷器的额定电压愈高，所用的阀片数愈多。普通阀式避雷器所用的平板间隙的结构如图所示，图（a）为单个平板间隙，由黄铜电极和云母片组成，其电场比较均匀，而且在加压后会在电极和云母片间的空气隙处强电场的作用下形成预游离，所以间隙的放电分散性小，伏秒特性平坦，易于实现绝缘配合。图



(b)为数个平板间隙组成的间隙组,避雷器的额定电压愈高,所用的间隙组愈多。为了使电压沿间隙组分布均

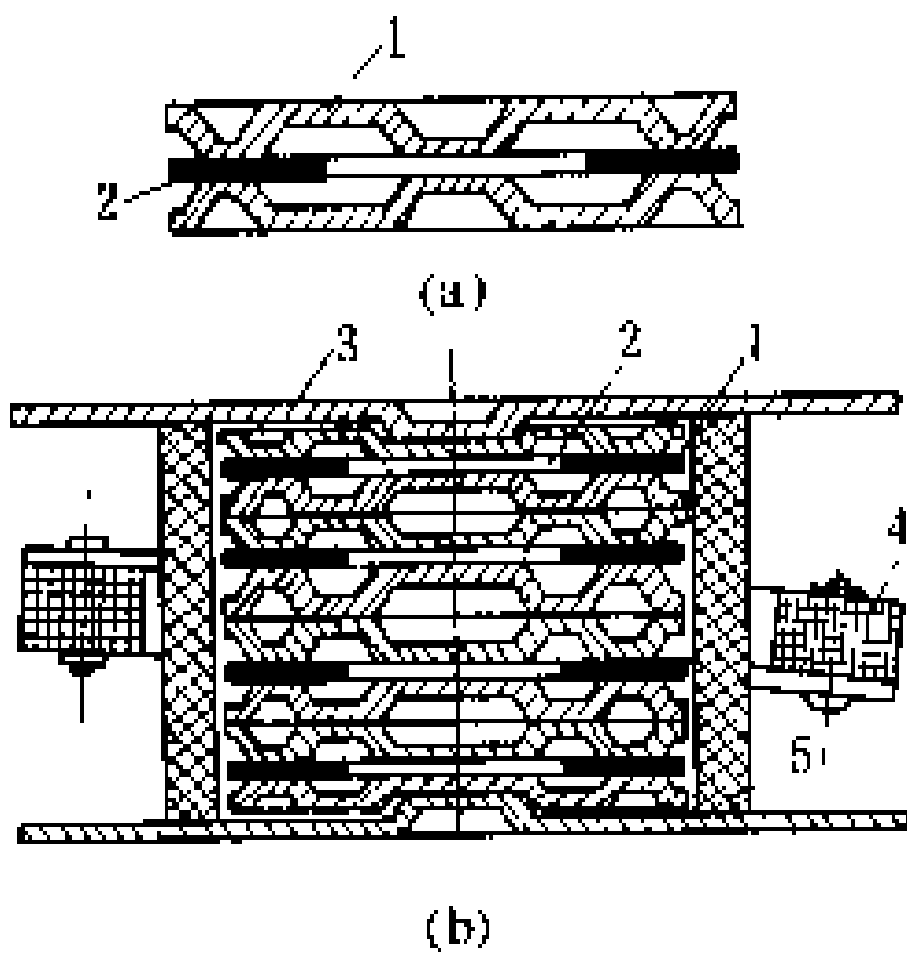
匀,在间隙组较多时,要在每个间隙组上并接高值的均压电阻。平板间隙是利用短弧近极效应切断工频续流的,所切断的工频续流不能超过 100 A (幅值)。

普通阀式避雷器在雷电冲击电流下的残压比磁吹避雷器和金属氧化物避雷器要高,其保护比为 2.4 左右。普通阀式避雷器在电力系统中已使用了半个世纪,现已逐步被磁吹避雷器特别是金属氧化物避雷器所取代。但由于普通阀式避雷器结构简单,价格低廉,在中性点非有效接地系统中,仍可以在一定范围内使用。

参考书目

机械工程手册 电机工程手册编辑委员会,电机工程手册·第 28 篇:避雷器,北京:机械工业出版社,1978

(李启盛)



(a) 单个平板间隙;  
(b) 间隙组  
1—黄铜电极; 2—  
云母片(约 0.5 mm  
厚); 3—黄铜盖板;  
4—半环形均压电阻;  
5—瓷套筒

普通阀式避雷器的间隙

# Q

qiti jueyuan jinshu fengbi dianqi

## 气体绝缘金属封闭电器 (gas insulated metal-clad switchgear)

将整个变电所的电气元件(变压器除外)如母线、断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、母线接地开关、避雷器等全部封闭在充有绝缘气体的接地的金属压力密闭容器内的成套装置,也称气体绝缘变电站,简称GIS。绝缘气体通常为六氟化硫( $\text{SF}_6$ )气体。充注的绝缘气体密度的大小取决于内部灭弧性能和绝缘性能的要求。GIS内部元件只有组合在一起并充以规定密度的绝缘气体时才能运行,不能拆开单独使用。

GIS内部元件,有的单独占有一个气室,有的几个元件联在一起占有一个气室。各个气室可以有不同的气体密度。气室内的导电部分与金属外壳之间用浇铸型环氧树脂绝缘子支撑,气室之间在电气上通过金属连接件连接起来。外壳之间的接口法兰均经过精密加工,使用耐腐蚀的O形密封胶圈将高压气体密封在内部。外壳上一般都安装有安全阀或防爆膜片。

按照使用条件不同,GIS分为户内型和户外型。户外型GIS(见图1)不需设置厂房,可减少建设投资,



图1 户外型 300 kV GIS

但长期受到日照雨淋,夏季温升增高,冬季(特别是严寒地带) $\text{SF}_6$ 气体可能液化。户内型GIS运行条件优越,但由于增加了厂房、吊车、排风等设施,建设费用增大。

按内部结构不同,GIS可分为三相共箱型及分箱型。三相共箱型是将三相电器安装在同一箱体内,用绝缘支架或隔板将其隔开。这种结构可节约金属外壳材料,并可节省占地。此外,当三相电流同时流过母线时,磁力线在外壳中相互抵消,可减少涡流损失。图2所示是110 kV三相共箱型GIS内部结构图。分箱型GIS中各相电器单独安装在分相的金属外壳内,金属外壳材料增多,涡流损耗大,占地也相应增大。但分箱结构简单,绝缘问题也较容易处理。

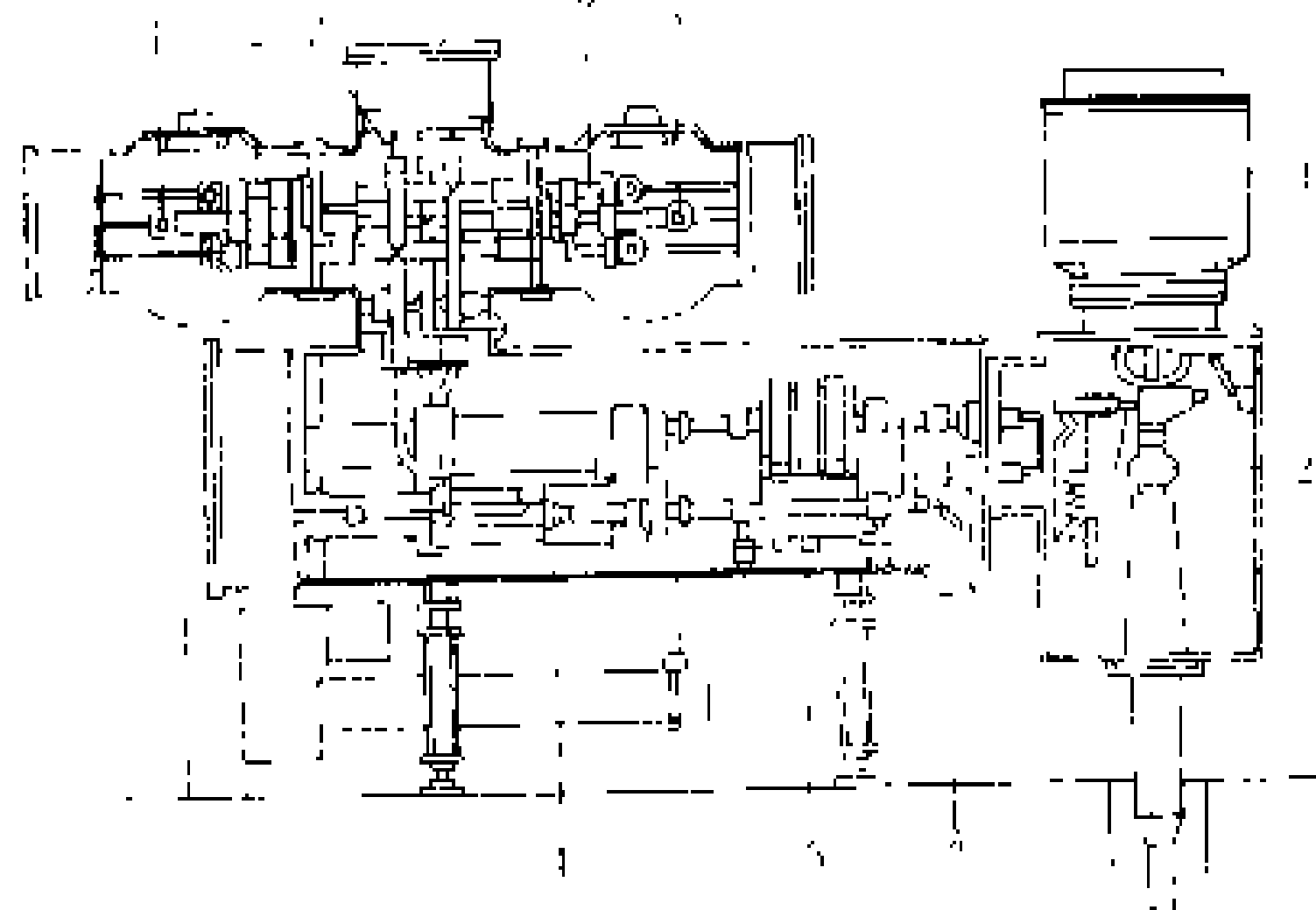


图2 110 kV三相共箱型GIS内部结构图

1—母线; 2—隔离开关; 3—接地开关; 4—断路器; 5—电流互感器; 6—电压互感器; 7—电缆终端

GIS与常规电器相比,其优点是:①可以大幅度缩小占地面积。例如,220 kV电压等级的GIS占地面积仅为相同规模常规变电所占地面积的15%左右;②设备带电部分全部封闭在金属外壳内,可避免高电压对环境的电磁污染;③可防止人员触电伤亡;④延长设备检修周期,一般可在10~20年内不必解体大修;⑤设备绝缘性能不受周围大气条件影响,耐震性强,能提高运行可靠性。

$\text{SF}_6$ 气体击穿特性与电极表面状况和电场有密切关系。因此,对于GIS的设计、加工及材料等方面均有严格的要求。GIS的造价高于常规电器。在工程设计上,计及占用土地面积、施工费用等,GIS总投资与常规电器投资的比随电压等级的提高而相对降低。

GIS运行维护的注意事项为:① $\text{SF}_6$ 气体密度和潮气进入容器的速度影响GIS内部绝缘强度,因此要严格限制漏气率,一般年漏气率不得大于1%;② $\text{SF}_6$ 在电场效应和电弧作用下分解成一部分低氟化物和氟化氢等剧毒性和强腐蚀性杂质,因此要在GIS内部放置专用的吸附剂,并需要定期处理或更换吸附剂;③定期检测 $\text{SF}_6$ 气体中水分含量;④GIS解体检修时,要有

防护措施,避免人员中毒;⑤运行时,GIS的金属外壳上可能存在循环电流,导致局部过热,因此在有关部位要设置高温标志以免灼伤巡视人员;⑥变电所内要配备SF<sub>6</sub>气体回收装置及专用工具;⑦GIS安装后投入运行前要作高电压耐受试验,以消除内部可能存在的绝缘隐患。耐压试验过程中,需按一定的程序升压。作工频耐压试验时,尽可能应用谐振式耐压试验装置,以免扩大故障部位;⑧GIS内部残存的金属颗粒极易导致电击穿,运行中通常利用声测法、压力探头法以及局部放电探测法等进行监视,预报可能出现的故障。在过电压保护方面,采用金属氧化物避雷器,以达到伏-秒特性的配合。

20世纪60年代,美国首次展出GIS。它的出现,使超高压变电所有可能建在城市中心地区、工矿企业厂房内以及水电站大坝上的厂房内。20多年来,GIS的电压等级已由3kV发展到765kV,而且仍在继续向更高的电压等级发展。

参见彩图插页第24页73图。

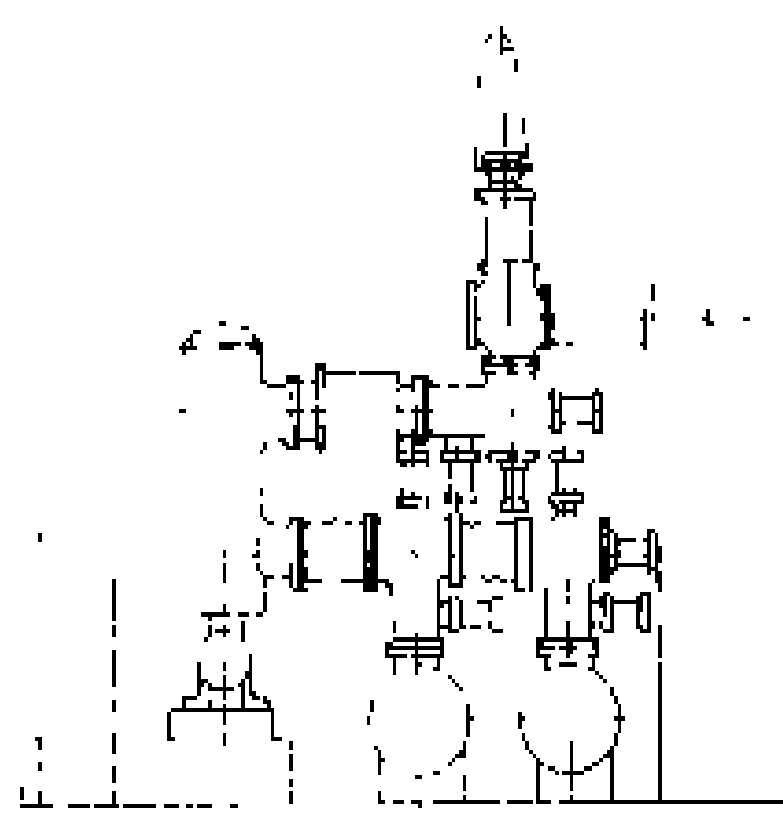
(黄维枢)

qiti jueyuan jinshu fengbi dianqi buzhi

**气体绝缘金属封闭电器布置** (arrangement of gas insulated switchgear; arrangement of GIS)

气体绝缘金属封闭电器把断路器、隔离开关、接地开关、电压互感器、电流互感器、母线、避雷器、电缆终端盒或出线套管等按电气主接线的要求,连接组合成一体,全部封闭于接地的钢或铝的金属外壳中,壳体内充以SF<sub>6</sub>等气体,作为绝缘和灭弧介质(见图)。气体绝缘金属封闭电器由制造厂成套供应,气体的

泄漏量要求每年不超过1%,每5~10年补气一次。气体绝缘金属封闭电器中每一回路内的气压不同,断路器的为0.5MPa,母线隔离开关的为0.2MPa。在配



110 kV 气体绝缘金属封闭电器

电装置中分为若干间隔,以便于分别检修电气设备和对SF<sub>6</sub>等气体的处理作业。六氟化硫断路器的布置方式有水平式和垂直式两种。水平布置时,可以在断路器两侧检修断口,多用于屋外配电装置;垂直布置时,检修断路器时要把灭弧室吊出,要求有一定的高度,但宽度可以减少,多用于屋内配电装置。母线有三相导体装在一个箱壳内的三相共箱式和三相导体分别装在独立箱壳内的分相单箱式。三相共箱式可以减少布置面积和材料消耗,用于

220 kV及以下配电装置中,而330 kV及以上电压,则采用分相单箱式。

气体绝缘金属封闭电器一般为标准接线单元,可以组合成桥形、单母线、双母线、多角形和一个半断路器等多种接线方式。气体绝缘金属封闭电器可靠性高,检修周期长,一般都不设置旁路母线。

气体绝缘金属封闭电器可以布置在屋内或屋外。布置在屋内时安装检修方便,不需要增设加热装置和防雨装置。500 kV及以上时则通常布置在屋外。气体绝缘金属封闭电器体积小,在架空出线回路数较多的屋外配电装置中,需要架设较长的SF<sub>6</sub>封闭母线,为此,研制了一种500 kV及以上的按进出线间隔组合单元的气体绝缘金属封闭电器,与架空母线混合布置。

气体绝缘金属封闭电器的优点是:①可以节省占地面积;②维护工作量大为减少,无触电危险,而且不受各种气象条件、海拔高度和污秽的影响;③SF<sub>6</sub>绝缘气体为惰性气体,使断路器开断时电弧压降很低,触头烧损轻微,检修周期可长达10年以上,而且无火灾和爆炸危险;④由于成套化使安装十分方便,并提高了运行可靠性。

在中国,由于气体绝缘金属封闭电器价格较贵,所以主要用于场地特别狭窄地区、加强外绝缘有困难的高海拔地区、地震区、严重污秽地区、重冰雹和大风沙地区。

(戈东方)

qiti jueyuan jinshu fengbi dianqi dianlan zhongduan

**气体绝缘金属封闭电器电缆终端** (gas insulated switchgear cable terminal, GIS terminal)

与气体绝缘金属封闭电器(GIS)直接相连接的电缆终端。因GIS的绝缘介质采用了SF<sub>6</sub>气体,故该电缆终端有时也称SF<sub>6</sub>终端,作为配套GIS进出线电源的一种接口。由于GIS的套管外部为SF<sub>6</sub>气体绝缘,增强了绝缘性能,故该类电缆终端不需制成伞裙形。气体绝缘金属封闭电器电缆终端按所连接的电缆型式不同而有不同的技术要求,如充油电缆SF<sub>6</sub>终端、固体挤压聚合电缆SF<sub>6</sub>终端。

**充油电缆SF<sub>6</sub>终端** 按充油电缆终端出线梗的不同密封方式可分成橡胶O形圈密封式和死密闭式两种。由于充油电缆绝缘油和GIS的SF<sub>6</sub>气体的绝缘性能不同,两种介质的工作压力不等,有相互渗透的可能。而充油电缆的绝缘厚度远小于GIS的气体绝缘距离,因此防渗漏的措施应以SF<sub>6</sub>气体不渗入电缆内为原则。

**橡胶O形圈密封式** 环氧套管和金具及出线梗接触面用既耐油又耐SF<sub>6</sub>气体腐蚀的橡胶作成O形

轴封圈,压紧密封。为了确保密封性能,有的用双重O形圈或过渡隔层。这种密封方式的优点是浇铸的环氧树脂套管比较简单,缺点是出线梗结构复杂,橡胶圈老化后密封不可靠,有渗漏的可能。此外必须提高充油电缆终端的油压,使它稍高于GIS的气体压力,因此要用中油压充油电缆,并在组合开关的电缆终端筒底部,装设漏油检测装置,以便检查。

**死密闭式** 将出线梗浇铸在环氧套管的顶部内,使充油电缆的绝缘油和GIS的 $\text{SF}_6$ 气体相互隔开,不需保持油压高于气压的特殊要求。这种连接方式的优点是低油压充油电缆能直接和GIS相连接,省去了转变油压的塞止电缆接头,缺点是出线梗和电缆导体连接的一端必须是梅花式插座,增加了一个活动电气接触点,且安装电缆终端真空注油时不易使残余气体全部排除。

**固体挤压聚合电缆 $\text{SF}_6$ 终端** 固体挤压聚合电缆虽不存在压力,并无严格的密封要求,但电缆终端内灌注的绝缘油(如聚异丁烯、硅油)在受热膨胀或冷却收缩时也可能与GIS中的气体相互渗漏,与充油电缆 $\text{SF}_6$ 终端不同的是, $\text{SF}_6$ 气体侵入固体挤压聚合电缆并不影响电缆绝缘强度,相反尚能抑制水树枝(见文联系聚乙烯电缆)的产生,但GIS因此必须经常补充 $\text{SF}_6$ 气体,增加检修的次数和费用。固体挤压聚合电缆 $\text{SF}_6$ 终端的优点是对GIS并无严格的密封要求,缺点是必须装设灌注油的膨胀器,以防绝缘油的突然膨胀,使环氧树脂套管爆裂。

(李贻荪)

qiangong dianhu

**潜供电弧** (secondary arc) 使用单相重合闸的长输电线路,在单相接地故障跳闸时,通常出现的一种电弧现象。它是由于单相接地的弧光通道中,从电源直接经故障点两端导线流入该点的一部分短路电流已被切断,而非故障相通过电的耦合和磁的感应,向弧道继续供电所导致的延续燃烧的电弧。它使系统继续处于接地状态,妨碍单相快速自动重合闸的实现。

单相快速自动重合闸可以提高单回线路的输电能力约10%~15%,经济效益显著。此处的“快速”是指“分—t—合分”操作顺序中的t在0.4~0.5s以下。220kV及以下输电线路的潜供电弧均能在此时限内快速自灭,它不会妨碍单相快速自动重合闸的应用。330kV及以上的输电线路,其潜供电弧一般不能快速自灭,必须采取措施。

潜供电弧的主要特性参数是潜供电流和电弧熄灭后作用在弧道的单位长度上的恢复电压梯度(均指它们的工频稳态值)。潜供电流和恢复电压梯度,均由电

容性分量和电感性分量合成。潜供电弧的自灭时间与潜供电流值、恢复电压梯度值、弧道方向(水平还是垂直)、环境风速有关。在诸因素中,潜供电流值和环境风速的影响最大。

**恢复电压梯度** 恢复电压梯度的电容性分量,是由带电的非故障相经由相间电容与故障相对地电容之间的分压关系形成的。电压等级越高,一方面恢复电压也越高,而另一方面绝缘子串的长度也越长,因而恢复电压梯度中的电容性分量的数值几乎不变。恢复电压梯度中的电感性分量是由非故障相中的工作电流经由相间互感引起的。这两种分量合成的恢复电压梯度约为10~20kV/m。

**潜供电流** 潜供电流中的电容性分量来自非故障相与故障相之间的分布性电容,其电感性分量来自它们之间的互感。由非故障相工作电流形成的互感分量有方向性,决定于工作电流的流向。当短路点在故障相中点上,潜供电流中的电感性分量左右对称,并互相抵消,使得总的电感性分量为零;相反,在故障相首、末两端的潜供电弧中的电感性分量最大,潜供电流也最大。因此,需要采取措施促使快速自灭的是线路首末两端的潜供电弧。

**降低潜供电流的措施** 当潜供电流工频有效值超过10~12A时,应采取措施降低其数值:①发生单相接地故障时,使故障相的首末两端快速接地,待电弧熄灭后,解除接地,线路重合闸;②将线路分为若干段,使每段的潜供电流值均低于10~12A;③当超高压线路上接有对地的并联电抗器时(首端或末端),在其中性点加装对地小电抗(jX),可以补偿潜供电流中的电容分量,从而降低潜供电流值;④在中性点加装小阻抗( $R+jX$ ),不但能补偿潜供电流中的电容性分量,还可补偿其电感性分量,效果更佳;⑤采用良导体架空地线。目前,世界各国采用的措施主要是加装中性点对地小电抗器(见中性点电抗器),中国也是如此。

理论计算和现场试验均表明,超高压线路采用的中性点对地并联电抗器参数与系统的相间电容正好处于谐振区域内。在这一谐振条件下,当发生短路的故障相被开断后,故障相上将出现危险的过电压。中性点加装的小电抗(也包括小阻抗),正好破坏了这一谐振条件,故它又是防止谐振过电压的有效措施。

需要说明的是:采用补偿的措施将潜供电流降至10~12A以下时,潜供电弧的自灭时间短于使用其他措施使潜供电流降至同一数值时的情况。

**三相自动重合闸的潜供电弧** 当三相线路没有对地并联电抗器而又同时断开时,即三相重合闸的情况,并不存在潜供电弧。但是,如果有对地的并联电抗器,即使三相已经开断,由于非故障相上的电荷经由电抗

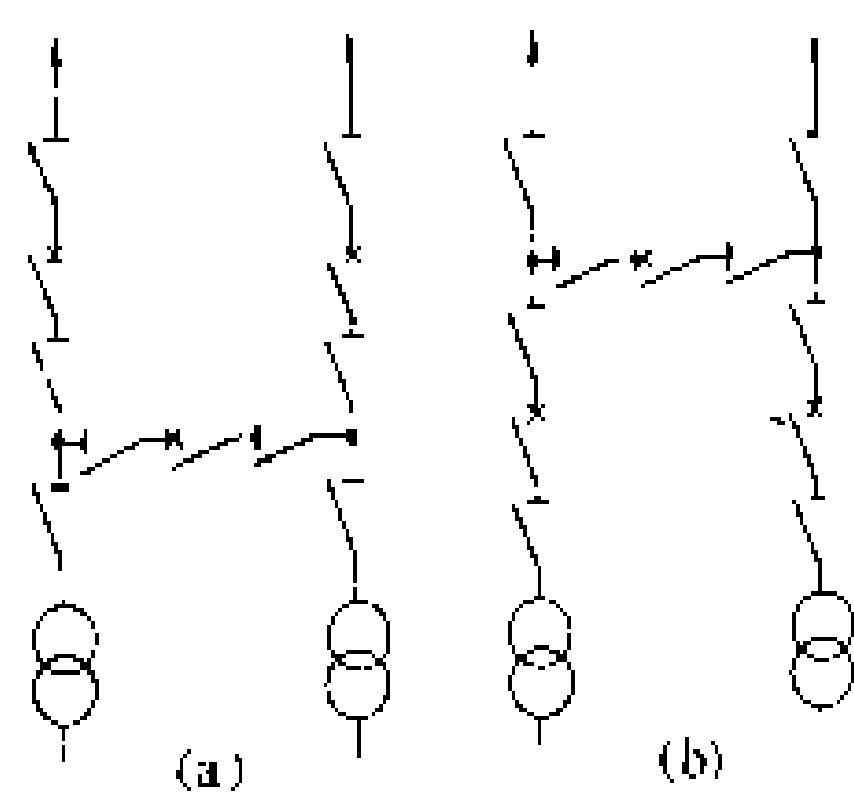
器对地释放,它所引起的放电过程能延续达数秒钟,电流值可达数百安。非故障相与故障相之间的耦合关系,同样能使潜供电弧难于在0.15~0.2s内自灭。在这种三相自动重合闸情况中,前述的单相潜供电弧的各种物理特性同样存在。

(曹荣江)

qiaoxing jiaoxian

桥形接线 (bridge-circuit configuration)

由一台断路器和两组隔离开关组成连接桥,将两回变压器-线路组横向连接起来的电气主接线。连接桥连接在变压器-线路组的变压器和断路器之间称为内桥接线[见图(a)]。连接桥连接在变压器-线路组的断路器和线路之间称为外桥接线[见图(b)]。



桥形接线

(a) 内桥接线; (b) 外桥接线

对内桥接线,当线路投入、断开、检修或故障时,都不会影响其他回路的正常运行,但当变压器投入、断开、检修或故障时,则会影响另一回线路的正常运行。由于变压器运行可靠,而且不需要经常进行投入

和断开,因此内桥接线采用得较多。

对外桥接线,当变压器投入、断开、检修或故障时,都不会影响其他回路的正常运行,但当线路投入、断开、检修或故障时,则会影响一台变压器的正常运行。因此外桥接线仅适用于变压器按照经济运行需要经常投入或断开的情况。此外,当线路上有较大的穿越功率时,为避免穿越功率通过多台断路器,通常采用外桥接线。

为了提高桥形接线的灵活性和可靠性,避免因检修线路或变压器时影响其它回路的正常运行,一般在接线中加设一跨条。内桥接线的跨条位置与外桥接线中连接桥的位置相同,外桥接线的跨条位置与内桥接线中连接桥的位置相同。跨条上通常设置两组串接的隔离开关,以便于跨条上隔离开关进行检修,此两组隔离开关在正常运行时是断开的。

桥形接线中使用断路器台数少,其配电装置占地也少,但可靠性较差且难以扩建。因此,桥形接线仅用于线路为两回、变压器为两台且不再扩建的变电所,如终端变电所等。

(尤国铭)

qiulei

球雷 (ball lightning) 闪电时形成的流动性

发光球的大气现象。球雷的直径为20cm左右,个别可达10m。球雷可能出现在天空中,也可能出现在地面附近,呈红、橙或黄色,常伴有嘶嘶声和特殊气味,存在时间可达3s以上,随风滚动,速度约2m/s,最后会自动消失或遇到障碍物而爆炸。球雷可引起燃烧并使金属熔化,也可伤害人畜。球雷可能是在闪电时由空气分子电离产生各种活泼化合物而形成的火球。世界上最早的球雷纪录见中国的《周易》,它记下了公元前1068年一次袭击周武王住房的球雷。中国福建古田1964年7月一个晴天曾发生过一次特大球雷,球雷分散后波及三十多户人家,伤亡多人。这种特大型球雷可能是太阳爆发抛出带电高温等离子体进入大气后与大气相互作用造成的。防止球雷袭击的办法是关上门窗,或至少不形成穿堂风,以免球雷随风进入屋内。

(解广河)

quyu biandiansuo

区域变电所 (regional substation) 向数个地区或大城市供电的变电所。

它将远处的电力转送到较远的负荷中心,还同时降压后向当地和邻近地区供电。在电力网最高电压的变电所中,除少数为枢纽变电所外,其余均为区域变电所。

区域变电所的电源线路有三种引入方式:①将一回双侧有电源的穿越线路断开接入;②将一回单侧有电源的穿越线路断开接入;③将双回线路断开接入。

区域变电所发生事故时将造成大面积停电,因此对其高压电气主接线的可靠性要求较高,通常采用双母线带旁路母线接线、双母线分段带旁路母线接线或一个半断路器接线等。

(徐锡镛)

quanbo chongji jueyuan shuiping

全波冲击绝缘水平 (full wave impulse insulation level)

电气设备在标准全波(1.2/50μs)冲击电压作用下耐受电压的能力,用规定的雷电冲击全波耐受电压(或全波冲击耐受电压)来表示。在中国,根据运行经验和经济技术比较,电气设备的全波冲击绝缘水平分内绝缘和外绝缘两方面分别确定。

内绝缘全波冲击绝缘水平 主要介绍220kV及以下和330kV及以上电压等级的变压器的内绝缘全波冲击绝缘水平的确定方法。

220kV及以下电压等级的变压器 其确定方法为:

(1)试验中绕组带工频励磁时,其全波冲击耐受电压为

$$U = 1.1(1.1U_5 + 15), \text{ kV} \quad (1)$$

式中  $U_5$  为避雷器在 5 kA 时的残压；括号内的系数 1.1 是考虑避雷器与变压器间的振荡而使变压器上的电压有所升高以及来波波头小于避雷器残压试验用的  $10 \mu\text{s}$  波头所引起的电压升高而增加的系数；括号内的 15 是考虑避雷器连线及接地电阻上压降的影响而增加的数值；括号外的 1.1 是累积系数。

其他电气设备的累积效应较变压器的小，但它与避雷器相距较远，其全波冲击耐受电压仍可按式(1)决定。

(2) 试验中绕组不带工频励磁时，应适当增大全波冲击耐受电压的幅值，以便考虑等效工频电压的叠加作用，其等效性以绕组首端匝间绝缘承受电压相等为依据。此时，全波冲击耐受电压的幅值为

$$U = 1.1(1.1U_5 + 15) + \frac{U_n}{2}, \text{ kV} \quad (2)$$

式中  $U_n$  为额定线电压。

330 kV 及以上电压等级的变压器 330 kV 及以上超高压变压器的内绝缘全波冲击绝缘水平是以避雷器 10 kA 残压  $U_{10}$  为基础，直接选用 1.4 的绝缘配合系数进行计算，即

$$U = 1.4U_{10}, \text{ kV} \quad (3)$$

**外绝缘全波冲击绝缘水平** 外绝缘可不考虑累积效应，但受大气条件的影响较大，对海拔 1000 m 及以下地区的电气设备，需取空气密度和湿度的综合修正系数为 0.84。220 kV 及以下电压等级电气设备外绝缘全波冲击耐受电压为

$$U = \frac{1.1U_5 + 15}{0.84}, \text{ kV} \quad (4)$$

330~500 kV 变压器外绝缘全波冲击耐受电压为

$$U = \frac{1.05 \times 1.1U_{10}}{0.84}, \text{ kV} \quad (5)$$

式中 1.05 是裕度系数；1.1 为距离系数，其他输配电设备的距离系数取 1.15； $U_{10}$  为避雷器在 10 kA 时的残压。

中国国家标准 GB311.1《高压输变电设备的绝缘配合》中的第 3.6.1 条，规定了 3~500 kV 输变电设备的全波耐受电压值。

(方 琦)

quanfengbi muxian xuanze

**全封闭母线选择** (selection of enclosed bus bar)

封闭在充满  $\text{SF}_6$  绝缘气体钢筒内的母线称为全封闭母线。它有如下两个特点：①母线全部封闭，不会发生由于外界物体造成母线短路故障，运行的可

靠性很高；②母线的外壳为接地钢筒，布置紧凑，节省占地。按母线结构形式不同分为分箱母线和共箱母线两种。分箱母线的每一相母线都单独的安装在一个充满  $\text{SF}_6$  绝缘气体的钢筒内，三相母线需要三个平行钢筒，导电体采用铜管或铝管，利用单相盘形绝缘子安装在钢筒的中心。共箱全封闭母线的 A、B、C 三相母线合并安装在一个充满  $\text{SF}_6$  绝缘气体的钢筒内，导电体的材料和分相封闭母线相同，三角形布置，采用三相盘形绝缘子安装在一个钢筒内。

全封闭母线的制造全部在工厂内完成，在现场只需要进行简单的组装。全封闭母线一般按以下条件进行选择：①满足额定电压和最高工作电压的要求。额定电压的条件主要是指绝缘水平，对 220kV 及以下全封闭母线按雷电冲击波耐压水平和工频耐压水平进行考核，对 330kV 及以上全封闭母线除上述二项指标以外，还应按操作波耐压水平考核。考虑最高工作电压的条件是因为全封闭母线一般由无间隙金属氧化物避雷器进行保护，要求避雷器的持续运行电压大于母线相对地最高工作电压。②满足额定电流的要求。要求全封闭母线通过最大工作电流时其发热小于允许值，不仅需要考虑导体的发热，而且需要考虑防止外壳发热的措施。③满足 3s 热稳定电流的要求。④满足动稳定电流的要求。

在 1970 年后，国际上开始研制全封闭母线，一般都采用分箱母线的结构形式，盆式绝缘子的制造工艺比较简单，电场强度的分布比较均匀，但占地面积较大。到 1980~1990 年期间，国际上开始大量采用  $\text{SF}_6$  全封闭母线，盆式绝缘子的制造工艺已经成熟，一般都采用共箱母线的结构形式，达到进一步节省占地和降低气体绝缘金属封闭电器高度的目的。

中国于 70 年代初，第一套 110kV 户内型  $\text{SF}_6$  绝缘全封闭母线在丹江口水电站试运行。80 年代初，220kV 户内型  $\text{SF}_6$  绝缘全封闭母线投入运行。天生桥水电站等工程 90 年代初采用了 500kV 户内型  $\text{SF}_6$  绝缘全封闭母线。由于  $\text{SF}_6$  气体绝缘全封闭母线的价格较贵，中国目前使用还不普遍，仅仅在占地非常紧张、土石方工作量十分巨大的水电站以及地下变电所等特殊情况下采用。随着高压或超高压电力网向城市不断发展，越来越多的城市变电所内将采用这种母线。

#### 参考书目

- 蓝增珏，袁达夫. 35~500 kV 铝管母线配电装置. 北京：电力工业出版社，1982
- 蓝增珏，叶景星. 500 kV 变电所电气部分设计及运行 上册. 北京：水利电力出版社，1987

(蓝增珏)



raoji dianqi jihe moxing  
**绕击电气几何模型** (electro - geometrical model of detour stroke) 见避雷线。

resuo dianlan zhongduan  
**热缩电缆终端** (heat shrinkable cable terminal) 用高分子聚合物的基料加工成绝缘管、应力管、伞裙等在现场经装配加热能紧缩在电缆绝缘线芯上的一种电缆终端。主要用于 35 kV 及以下固体挤压聚合电缆线路。

以高分子聚合物经挤压工序加工成管子和模压件后，通过电子束（也有采用  $\gamma$  射线的）辐照交联，再经过扩张工序，作成装配电缆终端用的具有弹性记忆的应力管（见电缆应力锥）、抗电炭痕管、伞裙等热缩部件。在安装电缆终端时，将这些部件套上电缆芯，用丙烷枪或喷灯加热，使这些部件受热后紧缩在电缆末端上，代替传统电缆终端的瓷套管、电缆胶、底盘和外壳等笨重部件，因此热缩电缆终端非常轻巧紧凑，工艺简单省时。

高分子聚合物在选定的温度下，通过辐照交联，产生了能保持在这个温度时的几何形状，其后如任其变形（即扩大或拉伸），暂时改变了形状，只需再经加热，又能自由复原到选定温度时的形态，这种物理特性称作弹性记忆。热缩终端的部件，都具有弹性记忆性能。美国首先发现了高分子材料的弹性记忆特性，并于 20 世纪 60 年代后推广应用于电缆终端的材料加工制作，设计了 35 kV 及以下的各种热缩终端和接头，得到世界各地的广泛应用。70 年代后又设计了 69~110 kV 的热缩终端，预期在不断的改进后也能被采用。

**抗电炭痕管** 用分子键牢固的高分子聚合物材料制成的管子（例如硅橡胶管），以代替电缆终端中传统的瓷套管。抗电炭痕管两端内壁涂有粘结剂，以便密封。高分子聚合物用作电缆终端表面时，在潮湿的空气中带有漏电电流，在湿度不大时，表面局部被电流烤干，形成绝缘较高的干领圈，承受了全电压，促使干领圈局部放电，电离后的臭氧，夺取了炭氢聚合物的氢原

子，残留炭原子，使管子表面形成炭化树枝状通路，最后导致击穿。因此，具有分子键结构牢固性能的抗电炭痕聚合物是热缩终端的重要材料。

**三叉手套** 用在三芯电缆的热缩终端中，防止雨水从三根绝缘线芯的空隙处进入电缆内，兼有绝缘线芯分开处护套作用的手套状部件。

**伞裙** 为了增加电缆终端表面的泄漏距离，用分子键结构牢固的抗电炭痕聚合物压制可热收缩的伞裙，按环境和电压不同，在电缆终端上套上一定个数的伞裙，收缩在抗电炭痕管上。

（陆德斌）

rengong wuhui shiyan  
**人工污秽试验** (artificial pollution tests)

电力设备的外绝缘按照规定条件在人工污染和受潮的状态下进行的高电压试验。它是判断外绝缘抗污秽能力的重要依据。依照施加电压的不同类型可分为直流污秽试验和交流污秽试验；依照施加电压对被试品的不同效应可分为污秽耐受试验和污秽闪络试验。污秽耐受试验即对被试品施加规定电压并维持一定时间而不引起破坏性放电的人工污秽试验。污秽闪络试验即对被试品施加逐渐升高的电压直至发生破坏性放电的人工污秽试验。污秽闪络试验不是标准试验，仅在特殊需要时进行。依照不同的涂污方式，人工污秽试验还可分为固体污层法和盐雾法，两种方法检验的有效性不同，不互相排斥，有时均需进行。

**固体污层法** 先在被试品表面涂一层污层，然后置于雾室中受潮并施加高电压的试验方法。污秽配方中除有用来调整污液电导率的 NaCl 外，还包括调整吸湿程度的硅藻土和调整粘合能力的糊精等混合物。污秽的程度用污层电导率或等值附盐密度来表示。污层电导率即流过被试品污层的工频电流除以施加电压的商与被试品形状因数的乘积。等值附盐密度即被试品单位绝缘表面上污秽沉积物的等值含盐量。产生雾的方法有喷射法和蒸汽法两种。

**盐雾法** 用 NaCl 与自来水配置成一定浓度（简称盐度）的溶液并喷成雾状，将清洁的被试品置于盐雾中并施加高电压的试验方法。

人工污秽试验要求较大容量的试验电源，以使被试品闪络前泄漏电流最大时，试验回路的动态压降不超过规定值，从而保证被试品上有足够的电压。为此，各国标准中对人工污秽试验的电源容量都有所规定。

（王如璋）

Riben Dongjing Dianli Gongsi 500 kV biandiansuo  
**日本东京电力公司 500 kV 变电所** (Tokyo



Power Company 500 kV substation of Japan)

日本东京电力公司从 1972 年 5 月第一个房总 500 kV 变电所投入运行以来, 至今已经相继建成数十个 500 kV 变电所, 它们采用相同的电气主接线和标准设计。以新所泽 500 kV 变电所为例说明它们的特点。

**建设规模** 500 kV 5 回出线, 275 kV 12 回出线, 6 组 500 kV、1000 MV·A 主变压器。由于 500 kV 线路长度较短, 没有 500 kV 并联电抗器。

**电气主接线** 500 kV 和 275 kV 配电装置都采用典型的双母线双分段接线。工作母线安装了 2 台分段断路器和 2 台母联断路器, 正常时工作母线分成 4 段环形供电, 所有的出线回路和主变压器进线回路均匀地分布在 4 段工作母线上运行。考虑到 500 kV 和 275 kV 均采用了六氟化硫断路器, 可靠性很高, 不需要经常地停电检修, 所以均不设置检修断路器用的旁路母线。此外, 由于正常时分 4 段母线环形供电, 因此任一段母线故障或者任一出线回路和主变压器回路故障, 将使全所的 1/4 停电, 即使出现最严重的 1 台母联断路器或者分段断路器故障, 也只会使全所 1/2 停电。这是日本东京电力公司典型的电气主接线形式。

**总体布置** 500 kV 配电装置宽 569.7 m, 长 181 m, 布置在全所北半部, 所有 500 kV 线路向北出线。275 kV 配电装置宽 400 m, 长 172 m, 布置在全所南半部, 所有 275 kV 线路向南出线。全所总共占地 135900 m<sup>2</sup>。在变电所的中部有一个长 400 m、宽 60 m 的区域, 均匀地布置 6 台 500 kV 主变压器, 主控制室和微波塔也布置在该区域内。主控制室位于全所中央, 离最近的 500 kV 主变压器只有 25 m。为了保证主控制室内有一个良好的工作环境, 在所有 500 kV 主变压器的四周都安装了防止噪声的隔音罩。

**高压配电装置** 500 kV 配电装置采用统一的结构型式, 它具有以下特点: ①采用断路器双列布置方案, 出线断路器布置在一列, 主变压器断路器布置在另一列。两组工作母线布置在中间。由于不设旁路母线, 因此配电装置没有双层构架。②间隔宽度(每一回路电气设备占地宽度)和母线构架宽度尺寸相等, 均为 34 m。采用出线门型构架和母线构架组合在一起的合并构架方案, 组成一个框架结构, 其抗震性能较好。③对配电装置的工频电场要求很严, 规定 500 kV 配电装置与 275 kV 配电装置相同, 要求距离地面 1.5 m 高处的电场强度 < 70 V/cm, 变电所围墙外离地面 1 m 处的电场强度 < 30 V/cm。所以 500 kV 配电装置的所有电气设备支架高度较高, 均大于 5 m, 同时采用多分裂的软导线, 降低 500 kV 导体表面的电场强度, 以降低 500 kV 配电装置的工频电场。主母线采用 3 × TAL1600 耐热铝合金导线, 单根导线截面积为 1600

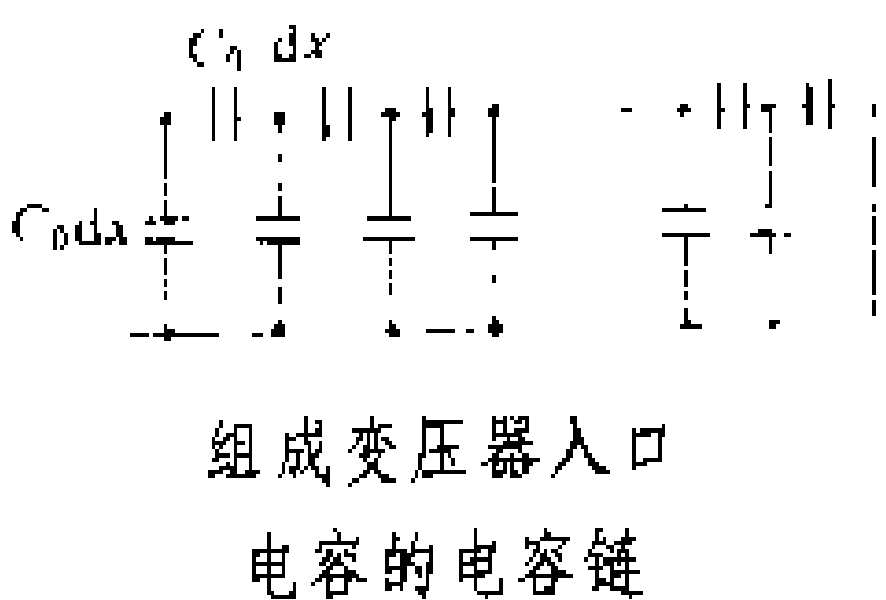
mm<sup>2</sup>, 三分裂导线正三角形排列, 两根单导线之间的分裂间距为 400 mm, 总载流量为 8000 A。线路和变压器回路采用 3 × HAL1260 普通铝合金导线, 单根导线截面积为 1260 mm<sup>2</sup>, 三分裂导线水平排列, 两根单导线之间的分裂间距为 200 mm, 总载流量为 3960 A。

(蓝增廷)

rukou dianrong

入口电容 (entrance capacitance)

当等值频率很高的雷电冲击波作用于变压器绕组时, 在最初的数微秒内, 冲击波不能通过变压器的电感回路, 只能以变压器的匝间电容和对地电容为回路流通, 在这段时间内变压器对外的作用可以用一个等值电容来取代, 该等值电容就称为变压器的入口电容。图示为组成变压器入口电容的电容链。图中  $C_0$  为绕组每单位长度的对地自电容,  $C'$  为绕组每单位长度的纵向互电容。当绕组长度为  $l$ , 全部对地电容为  $C$ , 全部纵向电容为  $C'$  时, 有  $C_0 = Cl$ ,  $C' = C'/l$ 。入口电容  $C_e$  可写成



$$C_e = \sqrt{C_0 C'} = \sqrt{CC'}$$

其值随变压器容量的增大而增大, 约在 500~5000 pF 的范围内。纠结式绕组变压器的入口电容比连续式绕组的为大。

在变电所防雷计算和防雷分析仪中, 变压器均用入口电容代替。增大入口电容可以改善变压器的防雷特性。

(陈慈莹)

ruanmuxian xuanze

软母线选择 (selection of flexible bus bar)

由铝绞线(或铜绞线)、钢芯铝绞线等软导体材料构成的母线称为软母线。软母线的选择方法按照母线选择的一般条件进行, 与硬母线选择不同, 它不需要考虑微风振动的问题, 机械计算也比较简单。软母线的选择往往由长期工作时的发热条件控制。如果采用由多根软导线构成的分裂导线式软母线, 则还包括排列方式、分裂间距和子导线最小直径等选择内容。

**子导线排列方式** 综合考虑导体的载流量、电场强度和金具三个因素: ①导体的载流量。分裂导线中由于子导线相互靠近使各子导线内电流密度不再是均匀分布, 这种现象称为邻近效应。邻近效应使分裂导线总的载流量下降, 不同排列方式的子导线的邻近效应不同, 载流量也就不同。总截面相等的三分裂导线, 水平

排列时载流量比三角形排列时约低 6.5%。②电场强度。分裂导线中由于子导线之间的相互影响,使子导线表面各点电场强度不同,这种现象称为附加影响效应。不同排列方式的子导线,表面电场强度的附加影响不同。总截面相同的三分裂导线,水平排列比三角形排列子导线表面最大电场强度约高 4.5%。导线表面电场强度增加,使电晕损耗和电晕无线电干扰水平都增大。③金具主要是分裂导线的间隔棒,通常是选择最简单的间隔棒型式,并使支接引下线连接最方便。

分裂间距 两根子导线之间的中心距离。当分裂间距增大时,导线等效半径增加,平均电容也增加,导线表面平均电场强度随之增加,有使导线表面最大电场强度增大的趋势。但是由于分裂间距增大,各子导线之间电场分布的附加影响减少,又有使导线表面最大电场强度下降的趋势。前者的影响大于后者时,则导线表面最大电场强度增加,反之则减少。因此对应每一种电压等级的分裂导线都存在着一个最佳分裂间距,对应的导线表面最大电场强度最低。通常是计算出分裂导线表面最大电场强度随分裂间距的变化曲线,根据曲线最低点求得最佳分裂间距。220 kV 二分裂导线最佳分裂间距为 120 mm; 330 kV 二分裂导线的最佳分裂间距为 250 mm; 500 kV 三分裂三角形排列导线的

最佳分裂间距为 400 mm,水平排列导线的最佳分裂间距为 200 mm。

子导线最小直径 按照电晕无线电干扰条件决定子导线的最小直径。通常计算出电晕无线电干扰水平随子导线直径的变化曲线,再根据允许的电晕无线电干扰值求得允许的子导线最小直径。例如 500 kV 变电所二分裂导线、分裂间距 400 mm,子导线最小直径的计算值为 44.5 mm,考虑一定的安全裕度,取子导线最小直径为 50 mm。

按照上述软母线的选择方法,在各电压等级配电装置中选用分裂导线的情况是:①35~220 kV 通常采用单根 LGJQ-185~700 软导线或者二分裂 LGJQ-185~700 软导线;②330 kV 通常采用单根 KKZ-400~800 扩径软导线;③500 kV 通常采用二分裂 LGJQT-1400 扩径软导线。

参考书目

蓝增珏,袁达夫.35~500 kV 铝管母线配电装置,北京:电力工业出版社,1982  
蓝增珏,叶景星.500 kV 变电所电气部分设计及运行 上册.北京:水利电力出版社,1987

(蓝增珏)



saizhi dianlan jietou

**塞止电缆接头** (stop joint) 能使油浸纸绝缘电缆的浸渍剂或充油电缆的电缆油在接头的两侧相互隔断的电缆接头。用作分割电缆线路油的压力,使各段油压不超过允许值。此外,当充油电缆线路的金属套破损时,还可防止整条线路的电缆油全部流失。充油电缆的塞止电缆接头都带有压力箱,按照暂态压力的计算(见电缆供油装置允许供油压力计算),如在电缆线路全长的中间装设塞止电缆接头,暂态压力仅为全长线路的 1/4。塞止电缆接头也可起到绝缘电缆接头的作用,这时压力箱的油管和塞止电缆接头要用绝缘缩节连接。

塞止电缆接头早先用在高落差的电缆线路中,如水电站与大坝之间的电缆出线,以防止低端电缆由于过大静油压力引起的缺陷。其后,充油电缆发展较快,应用于较长的电缆线路,为了防止暂态压力过大的缺陷,塞止电缆接头得到了广泛应用。目前,塞止电缆接头仍在不断研究改进,向简化工序、提高预制化程度方向发展。

电缆接头内浸渍剂或电缆油主要是通过导体的绞线间空隙、油道和绝缘层间流通。塞止电缆接头既堵塞这些油流的通路,而又保持电缆接头的特性。按电压等级和电缆结构的差异,塞止电缆接头可分成单腔式、双腔式和三腔式三种。

**单腔式** 导体连接用堵油的连接管,绝缘用环氧树脂浇注代替常用绝缘带绕包的一种塞止电缆接头。由于现场浇注的环氧树脂电性能较差,故只用在 10 kV 级及以下的电缆线路中。

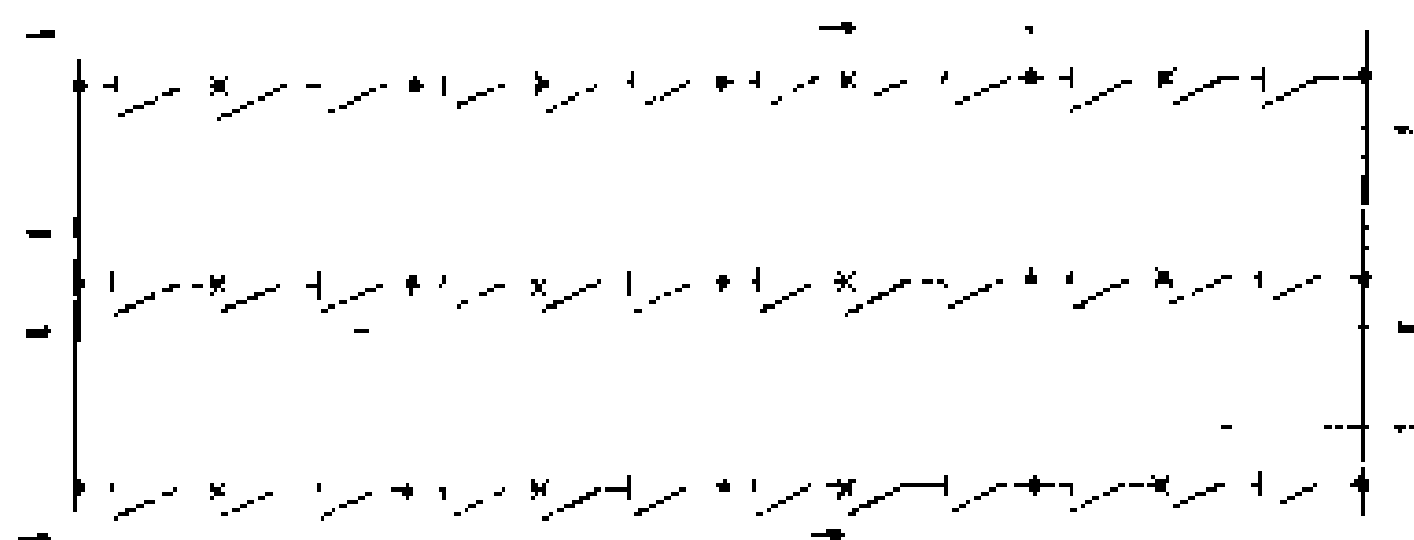
**双腔式** 用一只预制的环氧树脂套管或梭子式隔板以隔断接头两侧电缆油的流通并用中间实心的接线梗连接导体,使接头内分成二个独立油腔的塞止电缆接头。环氧树脂套管外壁具有螺旋凹形油槽,以便中空导体的油流进出压力箱,其内壁有屏蔽极与导体连接,以控制连接金具的不规则电场应力。这种塞止电缆接头的优点是结构比较简单,但必需在现场连续安装,费工费时。

**三腔式** 用二只预制的内外油腔互不相通的对称环氧树脂套管,使塞止电缆接头分成三个油腔,其中间油腔可以独立与压力箱连接,也可与任一侧油腔连接。二只环氧树脂套管连接处浇铸有屏蔽电极和插座式连接金具,这些组成件包括中腔绝缘层可以在工厂内预制成中腔筒。在现场将两侧电缆芯装设应力锥后插入预制中腔筒,即可完成安装。三腔式塞止电缆接头的优点是预制化程度高,缺点是结构复杂,而且导体必须使用插座式连接。为了防止插座式接点的相对移动(如负荷电流变化、土壤不均匀沉降等),尚需在插座式连接金具中增设闭锁装置。

(李榕荪)

santenzhisi duanluqi jiejian

**三分之四断路器接线** (breaker and one-third configuration; 4/3 circuit breaker configuration) 三个引出回路通过四台串接断路器(称作一串)分别接到两组主母线上的电气主接线。每台断路器的两侧均装设一组隔离开关,供检修断路器时隔离之用。在一些变电所和发电厂中,还在各引出回路上装设一组隔离开关,当该回路停止运行时,可以断开此隔离开关,以保持该串能继续运行,见图。



三分之四断路器接线

三分之四断路器接线通常用于进线回路数及其容量与出线回路数及其容量相差一倍左右的变电所和发电厂中。由两回出线和一回进线、或由两回进线和一回出线组成一串,容量较大的线路接在此串的中间,容量较小的两回线路接在此串的两端。

与一个半断路器接线相比,此接线使用的断路器数量较少。当检修一台断路器而另一台断路器又发生故障时,停电线路最多可达三回,即一串中的三回线路可能同时停电。由于此三回线路输入和输出电力基本平衡,相当于一个半断路器接线中一串停电的情况,因此这两种接线的供电可靠性是相当的。

三分之四断路器接线在中国尚未采用,在国外有少数发电厂采用,例如加拿大哥伦比亚水电局所属的水电厂曾采用此接线。

(尤国铭)

sanzhushi geli kaiguan

**三柱式隔离开关** (three - post type disconnecting switch) 由三个垂直布置的绝缘支柱及其他部件组成的隔离开关。中间支柱的顶部安装水平导电臂,随着中间支柱的旋转而改变位置。两个边侧支柱固定不动,其顶部均安装静触头。合闸时,水平导电臂插入两端的静触头;分闸时,中间支柱带动水平导电臂旋转 60°,在两侧静触头之间分别形成空气间隙,其隔离作用是由二个串联空气间隙形成的。其结构示意图如图所示。

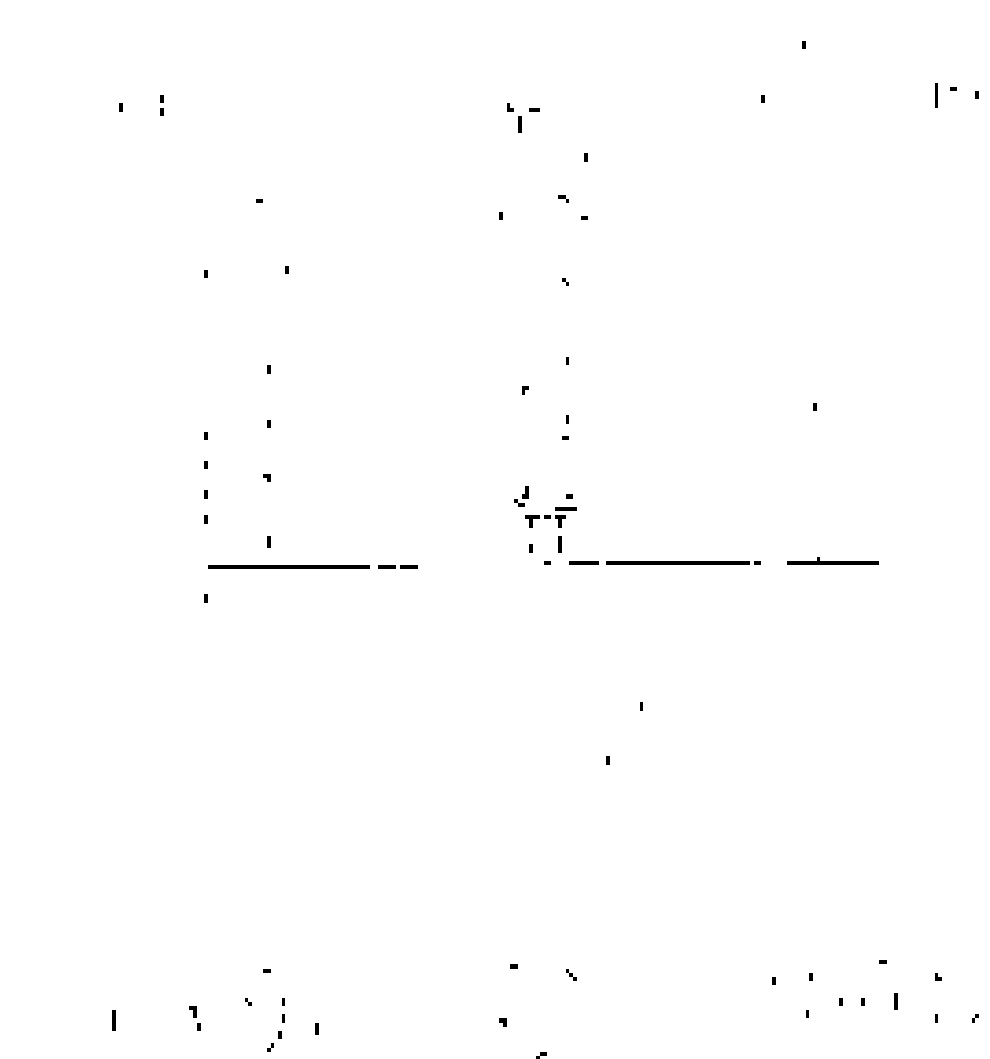


图 1-1-1 三柱式隔离开关结构示意图

三柱式隔离开关由于其支柱较多,加大了擦洗支柱绝缘子的工作量;中间支柱需要同时操作两个水平活动导电臂,其操作力较大。但它所要求的相间距离较小,故在 220~330 kV 配电装置中应用较多。由于它的纵向尺寸较大,用作母线隔离开关时,需要增加母线相间距离,从而增加配电装置的占地,因此一般都将三柱式隔离开关用作出线或进线隔离开关。在 500kV 配电装置中,由于它的纵向尺寸太大,水平活动臂太长,操作时会产生抖动,故一般都不采用。

参见彩图插页第 22 页 67 图。

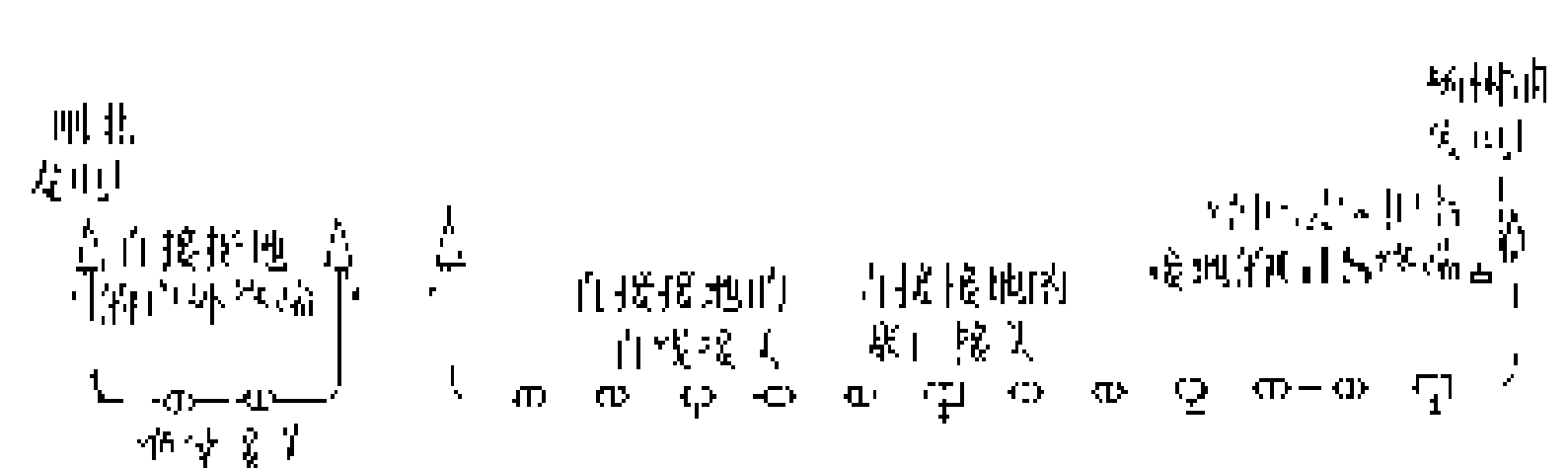
(蓝增旺)

Shanghai Zhabei - Yangshupu dianlan gongcheng

**上海闸北—杨树浦电缆工程** (Shanghai Zhabei - Yangshupu cable project) 连接上海的闸北发电厂至杨树浦发电厂的 220 kV 电力电缆联络线路。该工程包括自闸北发电厂引出的 220 kV 单芯自容式充油电缆长 790 m,用直埋方式敷设至钱家浜电缆终端站,经接上架空线 4.5 km,至虬江电缆终端站后连接敷设在排管内的 220 kV 充油电缆 4.4 km 至杨树浦发电厂 220 kV 六氟化硫断路器。电缆规格:单芯自容式,油道直径 12 mm,绝缘厚度 14.5 mm,波纹铝包厚 2.5 mm,黑色聚氯乙烯护层厚 4.5 mm,石墨涂层,外径 99 mm,重量约 17.5 kg/m,输送容量 240 MV·A。电缆及附件由意大利比瑞利电缆厂制造。电缆线路布置如图所示。

闸北发电厂端电缆有二个绝缘接头组成一个交叉

互联换位段。杨树浦发电厂端至虬江终端站电缆分成二个油段,每一个油段是一个交叉互联的换位段。杨树浦发电厂内 GIS 的 SF<sub>6</sub> 压力为 0.35 MPa,为防止气体漏入电缆内,采用油压高于气压,油压为 0.45 MPa。为了避免 GIS 端的 0.45 MPa 油压将整根电缆的油压提高,在六氟化硫断路器的下面用一塞止接头将 0.45 MPa 的高油压与出杨树浦发电厂的低油压段隔开,形成一个高压小油段。



电缆线路布置图

塞止接头是插入式的预制接头,分左、中、右三室。中段在厂内预制,现场安装的工作量相当于安装二个小型终端,终端制作后塞入中段,即可作真空浸油处理。一端进油后维持油压,观察塞止接头的左右室之间有无渗油,情况良好后再安装另一端。塞止接头的内部结构紧凑,外形尺寸较其他同类结构的小,长为 2.33 m,直径为 0.38 m。GIS 终端的电气结构及电场分布合理,尺寸较小。GIS 终端的底部装有能监视油漏入 GIS 筒体内的液位继电器。当有油自终端的底部或顶部渗漏至 GIS 筒体内后,就会集聚在继电器壳体内,使继电器内的浮筒浮起,由它动作一对接点发出漏油报警信号。

该工程的设计单位是上海电力设计院,施工单位是上海电缆输配电公司。工程于 1987 年 4 月开工,当年 11 月竣工,年底投入运行。

(李懿荪)

shangxinglei

**上行雷** (upward lightning) 先导放电首先由地面发生并向上发展到雷云的雷云放电现象。当地面有高耸的突出物时,不论雷云极性的正负,都可能发生上行雷。负上行雷(此时雷云为正极性)的上行先导是逐级发展的,每级长度约 5~18 m,负先导的电阻可估计为 10 kΩ/m。正上行雷上行先导的逐级发展不明显,正先导的电阻可估计为 0.05~1 kΩ/m。无论正、负的上行先导到达雷云时,因为雷云的导电性能不好,大部分并无主放电过程发生。此时其放电电流的幅值一般只为数百安,而持续时间很长,可达 0.1 s。即使在上行先导碰到雷云的电荷密集区而发生主放电时,电流也不太大,一般在 10~20 kA 以下。

(解广润)

shaoyou duanluqi

**少油断路器** (low - oil - content circuit breaker)

利用变压器油或专用断路器油作为触头间的绝缘和灭弧介质，而对地绝缘采用固体绝缘件的断路器。少油断路器的变压器油的作用和灭弧室类型与多油断路器的基本相同，但用油量比多油断路器少很多。典型的户外式高压少油断路器的结构示意图如图所示，它包含灭弧室、中间机构箱、支柱瓷套和底座等几个部分。

少油断路器是以欧洲国家为主发展起来的，目的是省油。在 20 世纪 40 年代，少油断路器的开断能力和使用寿命都很有限。自从采用了纵横吹式灭弧室后，其开断电流逐步上升。

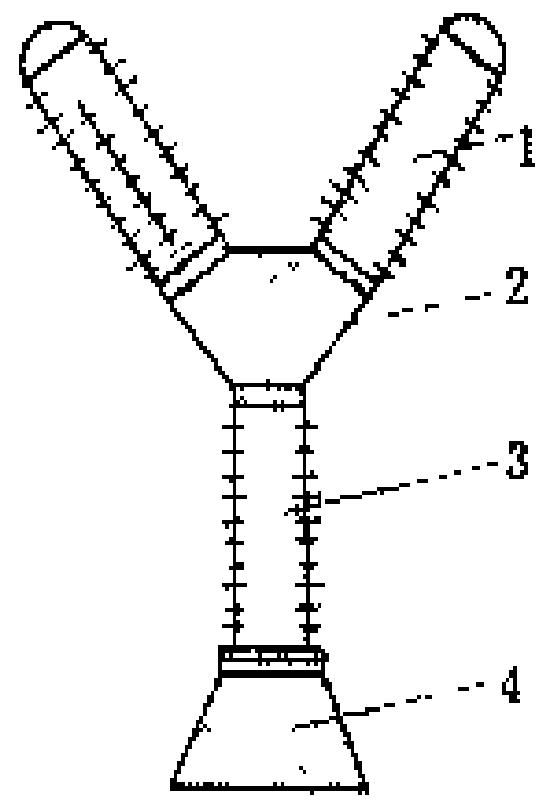
少油断路器普遍采用梅花瓣形触头，中间过渡采用滚动触头，从而提高了分、合闸速度。为了提高触头的耐弧能力，减少金属蒸汽，利用新发展的粉末冶金技术制作了铜钨合金触头。应用玻璃钢承压筒

也有效地提高了弧区压力，减轻了灭弧室瓷套的机械负荷，大大地增加了少油断路器的开断能力。液压机构的诞生，又使少油断路器的分、合闸速度达到 5~10m/s（每个断口）。少油断路器的更大优点在于积木式体系的发展，例如 20 世纪 50 年代的 220kV 少油断路器由完全相同的两个支柱（每个支柱又包含两个完全相同的断口）合成，这给制造特别是大容量试验带来极大的方便，加速了少油断路器向超高压、特高压发展的步伐。

少油断路器灭弧室在小电流下的开断性能较差，为此，发展了机械油吹的灭弧室，使用压油活塞将新鲜油流不断压入正在进行开断动作的触头间隙，提高其介电强度，防止开断后的复燃与重击穿。使用逆弧原理，即在灭弧过程中，电弧分解成的高温油气流向上运动，动触头向下运动，使动触头端部（其上存在弧根）总是与新鲜油接触，以提高灭弧性能。此外，使动触头向下运动的同时，迫使下部的油通过专设的油路从横向射入弧区，它也起到类似机械油吹的作用。

少油断路器经过不断地改进，其开断性能超越了多油断路器，开断能力从 50 年代的 16~21kA、60 年代的 31.5~40kA，提高至 90 年代的 50~63kA，单断口电压等级达到 154/√3 kV，并采用积木式结构，能组合成各种电压等级的产品。

但从世界范围来看，少油断路器的发展进程已接



户外少油断路器结构示意图

1—灭弧室；2—中间机构箱；3—支柱瓷套；4—底座

近尾声。虽然在少油灭弧室中增加内压力还可获得更佳参数，但它已逐渐被新发展起来的敞开式六氟化硫断路器所取代。

在中国，自 60 年代发展 220kV 少油断路器开始，少油断路器的开断电流由最初的 16kA 发展到 40 kA。少油断路器在中国的 110~220kV 级的系统中仍占主导地位，并做到 330kV 级。10kV 级的少油断路器在中国更是使用得相当普遍。

(曹荣江)

shengya bianyaqi

**升压变压器** (step - up transformer)

利用电磁感应原理将发电机发出的电能从发电机电压升高至较高电压输出的设备。

发展简史 与采用交流输电同时，19 世纪 80 年代初就有首创的升压变压器问世，高压仅为 1.0kV，容量为 5kV·A，到 20 世纪初才制成 1MV·A 的变压器。此后，升压变压器的容量越来越大，升高的电压也越来越高，到 20 世纪 70 年代初制造的升压变压器的容量已达 1300MV·A，升高电压到 345kV。现在已能制造 1500MV·A、765kV 三相大型升压变压器与 1300MW 的汽轮发电机相匹配。发电厂采用的升压变压器目前都是用变压器油作冷却和绝缘介质的油浸式或强迫油循环式。冷却方式有自冷、风冷、水冷三种。40 年代已研制用 SF<sub>6</sub> 取代油，到 80 年代开始用氟碳化合物作蒸发冷却介质，变压器容量已达 300MV·A。

中国从 50 年代初开始试制仿苏设计的电力变压器，50 年代末自行设计，60 年代中国制造的变压器继续向高电压、大容量发展，70 年代初变压器电压等级提高到 330kV，70 年代末再提高到 500kV，容量最大的已达三相 360MV·A。

结构 升压变压器广泛采用油浸式电力变压器，主要由导磁的铁芯、导电的低压和高压绕组及油箱和散热器或冷却器组成。铁芯由用 0.35mm 厚或更薄的冷轧硅钢片叠成的铁柱和铁轭组成。铁柱的截面是近似圆形的多级梯形。绕组取圆筒状，套在铁柱上，其引出线经装在油箱上的套管接出。

型式 按绕组数分，有双绕组、三绕组和自耦三种；按相数分，有三相和单相两种；按调压方式分，有无励磁调压或有载调压两种。

主要参数 额定容量和额定电压是升压变压器的主要参数。与发电机直接连接的升压变压器其额定容量与发电机的额定容量相匹配，并考虑发电机的最大容量。低压侧的额定电压与发电机的输出电压相同，高压侧的额定电压及调压范围和级数按电力系统的要求选定。

**选用** 一般选用双绕组变压器，如有两种等级升高电压且相互之间有功率交换时，中等容量机组一般选用三绕组或自耦变压器，可节省投资；但大容量机组不采用三绕组升压变压器，以避免在低压侧装设造价高的断路器。

当高、中压两级电网均为中性点直接接地系统，且两级电网电压之比接近2时，采用自耦变压器较合理。与三绕组变压器相比，自耦变压器体积小、重量轻、损耗小、效率高；缺点是漏抗小，单相及三相短路电流大，增加对无线电和通信的干扰，并使变压器各侧电气设备价格较贵。因此采用自耦变压器要经过经济技术比较后确定。

大容量三相变压器在制造上已无困难，如运输条件允许，一般多采用三相变压器。单相变压器仅在运输条件受限制时采用。

**调压** 与发电机直接相连的双绕组变压器不需采用有载调压装置，可通过调节发电机的电压来改变变压器的输出电压。

三绕组变压器当功率大小及方向变化大，电压偏移超过额定运行电压的±5%时，应采用有载调压装置。目前广泛将有载调压装置装在与变压器油箱分隔开的单独油箱内，防止调压装置经常动作使变压器油劣化。

**冷却** 大型电力变压器目前广泛采用强迫油循环风冷系统，比过去曾采用过的强迫油循环水冷系统工作可靠。

(欧阳应川)

shishiyān

**湿试验** (wet test) 电力设备的外绝缘按照规定条件在人工淋雨状态下进行的高电压试验。按照施加电压的不同类型分为直流湿试验、交流湿试验和操作冲击湿试验；按照施加电压对被试品的不同效应分为湿耐受试验与湿闪络试验。湿耐受试验即对被试品施加规定电压并维持一定时间而不引起破坏性放电的湿试验。湿闪络试验是对被试品施加逐渐升高的电压直至绝缘表面发生破坏性放电的湿试验（见交流电压试验）。湿试验常用于产品的型式试验。

进行湿试验时，喷射人造雨的淋雨装置、人造雨的雨水温度、电导率、淋雨量及淋雨角度以及人造雨参数的测量仪器及测量方法等，在国际电工委员会(IEC)标准及各国标准中都有明确规定。湿试验时被试品的布置应尽量与其运行状态一致。在保证被试品对接地体和邻近物体不闪络的条件下，被试品与接地体和邻近物体的距离可取比干试验中的距离较小的数值。

(王如璋)

shiyān biànyāqī

**试验变压器** (testing transformer) 产生工频高电压的试验用变压器。主要用于研究电气设备和绝缘材料在工频电压作用下的绝缘性能以及其他与工频高电压有关的各种电气性能，例如高压输电线路的电场效应、电晕损失、电磁干扰等。试验变压器也可用于产生操作冲击波，研究操作过电压下电气设备的绝缘强度。

试验变压器的工作原理与电力变压器的相同，但有以下特点：①电压较高，容量较小；②工作时间短，温升较低，不必采用复杂的冷却系统；③不会受到过电压的侵袭，绝缘的安全裕度可较小；④由于绝缘裕度小，允许温升高，故在额定电压和额定功率下只允许短时运行；⑤短路阻抗较大；⑥对波形畸变率及局部放电量有较严格的要求；⑦通常通过调压器供电，以输出可调节的工频高电压。

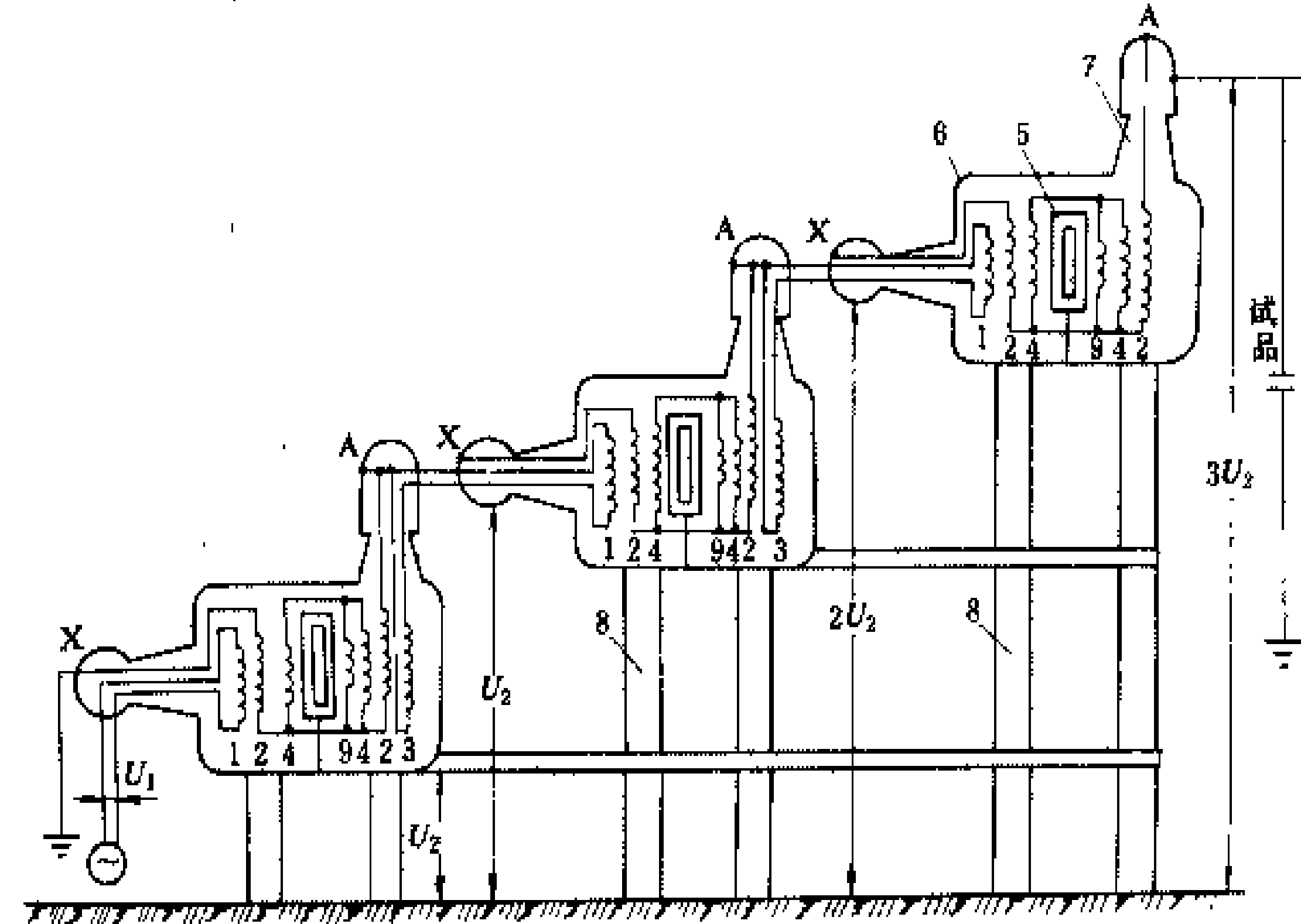
试验变压器的结构按外壳材料可分为绝缘外壳式和金属外壳式两种。前者绝缘尺寸较小且不需套管，故整个变压器的尺寸和重量都较小。按套管数量可分为单套管式和双套管式两种。双套管式的高压绕组中点接铁芯和外壳，故高压绕组对铁芯及外壳、套管对外壳的电压都只有输出电压的一半，大大减轻了内、外绝缘的负担，有利于减小变压器的尺寸和降低重量，特别适用于额定电压较高(500~750 kV)的试验变压器。双套管试验变压器外壳对地的电压也是输出电压的一半，不难用瓷支柱加以绝缘。

试验变压器的主要技术参数是额定电压和额定电流。额定电压为250 kV及以上的试验变压器，其高压绕组的额定电流多为1 A，额定电压为250 kV及以下的可以小于1 A，这对大多数被试品已可满足试验要求，但用于外绝缘湿试验和外绝缘人工污秽试验的试验变压器，应有较大的容量。

由于变压器的体积和重量近似与其高压绕组电压的三次方成比例，故单台变压器的额定电压不宜太高(目前最高做到750 kV)。为了获得更高的电压，可将几台变压器串接，即串级试验变压器。图示为一种最常用的串级试验变压器的电路。各台变压器的高压绕组2相串联，累接绕组3串接在前级变压器的高压绕组上，并由它供给后一级变压器的励磁电流。各台变压器的外壳、铁芯均与各自的高压绕组的中性点相连接，所以，各台变压器外壳对地具有不同的电位，如图所示。总输出电压是各台变压器输出电压之和，但单台变压器承受的电压不变，因而大大简化了变压器的内部绝缘结构，减小了套管的尺寸。串级试验变压器的总造价较低，运输安装方便，使用灵活，比提高单台变压器的额定电压更为经济、合理。目前，已做到

由三台 750 kV 变压器串接为 2250 kV 的串级试验变压器。

排列方式。由于导线在架空输电线路建设费用中所占比重最大，合理地选择导线结构不仅影响到线路的运行特性，也可避免线路建设投资中的浪费。



具有累接绕组的双套管串级试验变压器原理图

1—励磁绕组；2—高压绕组；3—累接绕组；4—平衡绕组；5—铁芯；6—外壳；7—套管；8—绝缘支座；9—补偿电抗  
 $U_1$ 、 $U_2$ —单台变压器的一、二次侧电压

由于前级变压器除供给负荷容量外，还需供给后级变压器的励磁容量，因此，串级变压器的额定容量小于各单台变压器额定容量之和，使得整体装置的利用率较低，级数越多，利用率越低。又由于串级变压器的短路阻抗随串接级数的增多而急骤增加，从而会大大降低设备的短路容量，因此影响外绝缘湿试验和人工污秽试验的结果。一般串级试验变压器的级数不超过 3~4 级。

为减小试验变压器的短路阻抗，常在变压器内装设平衡绕组(如图中绕组4)以减小漏磁通，从而降低短路阻抗。有些试验变压器内还装设补偿电抗器(如图中绕组 9)，当被试品电容较大时，补偿电抗器提供的电感电流可以补偿电容电流，以提高试验电源的利用率。

参见彩图插页第 42 页 126 图。

参考书目

张仁豫等，高电压试验技术，北京：清华大学出版社，1982

(王如璋)

shiyān xiànduàn

**试验线段** (test line) 专供研究架空输电线路导线结构用的试验线路。试验线段的主要功能是用以进行导线的电晕特性试验。通过不同尺寸和不同结构导线的电晕损失、无线电干扰和可听噪声等的测量比较，选取最合适的导线直径、分裂根数和子导线的

试验线段的长度一般为数百米，也有的达数千米。短的试验线段便于更换导线，比长的灵活，测量数据的精确度也易于控制，但要严格控制线段两端的端部效应，使其不影响被试导线的电晕特性。交流电压的导线电晕特性试验，一般只做单相试验。直流电压的导线电晕特性试验，则需要按直流输电线路的运行方式，做单极性试验或双极性试验，或两种极性的试验都做。

由于气象条件对导线电晕放电的影响很大，所以试验线段的建设地点要有代表性，要使试验线段所处的气象条件与拟建的架空输电线路所在地区的相似。

(杨吟梅)

shou cheshi kaiguangui

**手车式开关柜** (switchgear panels with switching devices on truck) 由固定的柜体和可移开的手车组成的开关柜，是移开式开关柜的一种。手车上装有断路器、互感器、变压器、避雷器等元件，手车部分可以互换，检修时只需更换手车，可缩短检修停电时间，适用于负荷较重要或建筑面积较小的场所。按柜内结构不同，又可分为间隔式和金属铠装式两种。柜内根据检修、绝缘等要求分成小室，减少相互影响。小室分为手车室、主母线室、互感器室、继电保护和仪表室等。柜体正面有门，所有仪表都装在门的内侧或仪表室内。检修时打开门，仪表即可外露。柜内设有照明，通过门上的观察窗可观察少油断路器的油位或真空断路器的灭弧室。手车具有三个固定的操作位置：运行位置、检修位置和试验条件下能操作的位置。手车式开关柜还有防止误操作功能，当电气回路有误操作时，断路器能自动分闸以及断路器在合闸位置时接地刀闸不能合闸等。为使大电流手车式开关柜便于操作，手车上设有手摇机构，可将手车摇进或摇出开关柜。

手车式开关柜广泛应用于 3~35 kV 的发电、输配电和用电的变电所。它将最终取代固定式开关柜。

参见彩图插页第 23 页 71 图。

(顾宪鸿)

shumi brandiansuo

**枢纽变电所**（key substation）电力系统中的枢纽点，汇集多个电源和联络线或连接不同电力系统的重要变电所。它在电力系统中的主要作用和功能是：①汇集分别来自若干发电厂的输电主干线路，并与电力网中的若干关键点连接，同时还与下一级电压的电力网相连接；②作为大、中型发电厂接入最高一级电压电力网的连接点；③几个枢纽变电所与若干输电主干线路组成主要电力网的骨架；④作为相邻电力系统之间互联的连接点；⑤作为下一级电压电力网的主要电源。

中国枢纽变电所中的最高电压通常为 220~500 kV。由于电力网的发展和扩大，电力网的最高电压也随之提高，例如中国西北地区的 330 kV 电力网和其他地区的 500 kV 电力网均逐步覆盖了原有的 220 kV 电力网。因而枢纽变电所的最高电压也随之提高，而且通常是电力网中最高一级的电压。

枢纽变电所中每台变压器的容量都较大，220 kV 变压器容量通常为 90、120、150 MV·A 等，330 kV 变压器容量通常为 240、360 MV·A 等，500 kV 变压器因受运输条件的限制通常采用单相变压器组。枢纽变电所中由高压侧向中压侧供电，必要时也可以向低压侧供电。根据需要也可以在低压侧连接同步调相机、静止补偿装置或并联电容器、并联电抗器等。

枢纽变电所的进线和出线回路较多，当高压侧电压为 220 kV 时通常有 8~12 回，330 kV 时有 6~8 回，500 kV 时有 4~6 回。

枢纽变电所通常由电力网总调度所进行调度。枢纽变电所发生事故将破坏电力系统的运行稳定性，使相连接的电力系统解列，并造成大面积停电。

由于枢纽变电所在电力网中的重要性，因此对其电气主接线、电气设备、保护和安全自动装置都要求具备较高的可靠性，以避免因变电所中发生事故而影响电力网的正常运行，或造成电力网瓦解等严重事故。与此同时，在主要电力网结构设计中，原则上应力求避免在枢纽变电所中集中过多的电源和输电主干线路，以免在主要电力网结构上形成事故要害点与弱点。

参考书目

河北电力设计院编，发电厂变电所电气接线和布置，北京：水利电力出版社，1984

（徐锡镛）

shudian rongliang

**输电容量**（transfer capacity of power transmission）输电线路在规定的工作条件下送端允许通过的有功容量值，也称为输电能力或输送能力。输

电线路的输电容量，不仅与线路本身技术条件（如电压等级、线路结构、导线截面、线路长度等）有关，还与当时电力系统和线路的工作条件有关。同样技术条件的线路，作为发电厂输出线、作为某两连接点的连接线、作为向某一负荷点供电线、或者作为两大电力系统之间的联络线，因其在电力系统不同发展阶段中所处的地位和所起的作用不同，外部技术约束条件不同，其输电容量也各不相同。甚至即使是同一路，在电网的不同运行方式下，其输电容量亦不相同。因此，在谈到具体输电线路的输电容量时，需要同时说明它在电力系统中所处地位、所起作用以及决定其输电容量的外部技术约束条件。

确定输电容量的技术约束条件有：导线容许发热、线路允许电压降和电力系统安全稳定测试条件。对于输送距离较短的线路，由导线允许发热条件确定其输电容量；对于向某一负荷点供电的线路，常按允许电压降来确定其输电容量；对于长距离、重负荷线路，则要求按电力系统安全稳定测试条件确定其输电容量。电力系统的安全稳定测试条件，由国家有关部门的技术标准予以规定。

自然功率 输电线特征参数之一。其表达式为

$$P = \frac{U^2}{Z}$$

式中 P 为自然功率，MW；U 为线路电压等级，kV；Z 为波阻抗，Ω。自然功率决定于线路结构和电压等级，与外部条件及运行工况无关。表中列出了几个电压等级线路的自然功率参考数值。

输电线的波阻抗与自然功率

线路电压等级 (kV)	波阻抗 (Ω)	自然功率 (MW)	导线分裂数
220	400	121	1
330	303	360	2
500	278	900	3
750	256	2200	4

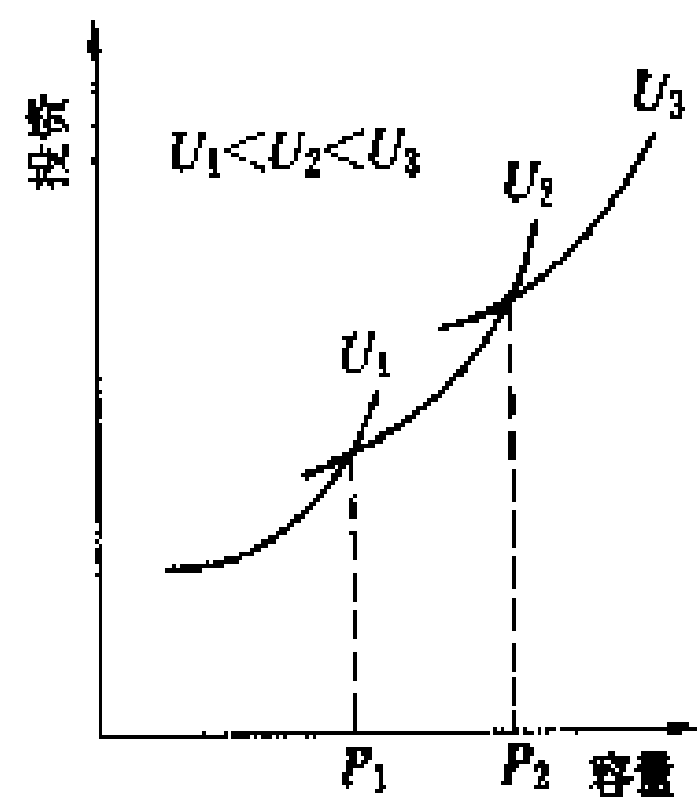
输电线路输送自然功率时，线路单位长度的无功损耗与充电功率相等，线路实现无电压降输送。输电线路输送功率大于（小于）自然功率时，线路无功损耗大于（小于）充电功率，线路末端电压低于（高于）送端电压。这将决定对线路无功补偿技术措施的不同要求。

经济输送容量 根据线路造价和损耗等经济因素确定的合理输送容量。对于一种输电要求，一般可有几种不同电压等级的输电方案能满足其技术要求，但各方案的线路回路数、系统短路容量水平、无功补偿设备的需求、以及系统安全约束条件的不同，其综合投资不同，且在一定的输送容量范围内，必有某一种电压等级的方案最经济。



经济输送容量与电压等级的一般关系如图所示。

图中  $U$  为电压等级，且  $U_1 < U_2 < U_3$ 。任一既定电压等级的线路，当输送容量逐步增加时，投资也逐步增加。当输送容量小于或大于某个数值时，则另一种电压等级的线路将更经济。



图中曲线的交点即为各不同电压等级的经济输送容量的分界点。分界点的具体数据，由具体经济比较而得。一般条件下，输电回路数以 2~4 回为宜，回路数过多易受线路走廊条件限制。单回路安全稳定水平较低，一般不宜用于输电主干线。为了避免线路无功补偿的困难，输电线应按输送自然功率设计。输送容量较大时，可考虑采用高一级电压等级线路。

**输电容量的外部约束条件** 从大电源向电力网输送电力的输电线路，其输送容量要与电源容量相适应并留有余地，避免因线路故障，使电源出力受阻，而降低电力系统的可靠性。

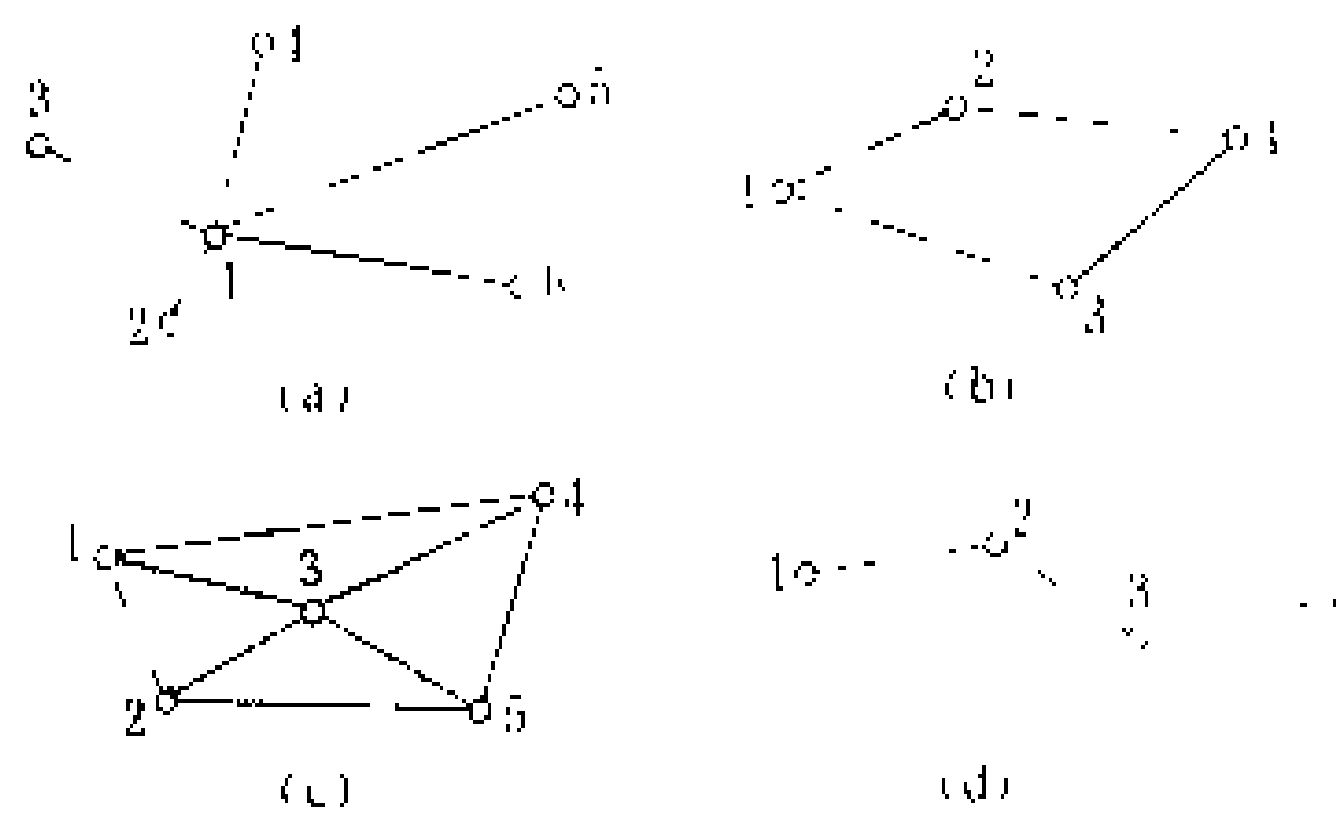
**复杂电力网（如环状网络）中的输电线路**，其输送容量不决定于线路自身的能力，而是受网络结构、系统安全稳定测试条件以及运行方式等外部约束条件限制，输送容量的不独立性尤为明显。特别是在不同电压等级的线路经变压器耦合的电磁环网中，由于网络阻抗的不均一性，高一级电压等级线路的潮流远低于其输送能力，而低一级电压等级线路的潮流过重以致线路过负荷，使电网输电能力不能充分利用。（见输电网络）

**提高输电容量的措施** 主要有：①改善电力系统的潮流分布；②改善网络结构；③提高继电保护和自动化水平；④提高输电电压等级；⑤降低波阻抗、提高自然功率；⑥提高线路设计可靠性水平，降低故障率。目前国外正在研究新型输电方式，以提高输电线路自身的输电能力。其主要研究课题有高自然功率线路、紧凑型输电线路以及六相输电（见输配电技术展望）等新技术，并已呈现了实用前景。

（费翊群）

等级的输电网连接。

**网络结构型式** 一般可分为放射状、环状、网状和链状等基本结构型式，如图所示。实际的输电网络往往是多种结构的混合体。不同结构的网络，其可靠性和输电线路容量的要求也不同。任何一种网络类型的形成，并不是任意的，它与电源开发建设、负荷分布、经济发展历史以及自然条件等因素有关，但也不能任其自流、逐年延伸，以致造成网络结构的不合理。做好网络规划，有预见、有目的地发展网络，是建设好电力系统的根本保证。



输电网络的基本结构

(a) 放射状；(b) 环状；(c) 网状；(d) 链状

**放射状网络** 如图 (a) 所示，除放射的中心节点 1 而外，其他节点均只与一条输电线（或一个方向的几条并联输电线）相连，该输电线的容量以满足它所连接的节点的要求而定。一条线路或一个方向的并联线路如果中断，该节点即与网络分离，其可靠性较差。

**环状网络** 如图 (b) 所示，任一节点均有两条输电线（或两个方向的并联输电线）与之相连，任一方向的线路断开后，节点仍与网络相连，故其可靠性较放射状网络的高。输电线的输电容量除应满足网络正常状态下的输电要求外，还应满足网络中其他方向的线路断开后的非正常方式下的输电要求，以避免未中断的线路因潮流改变而过负荷跳闸，造成连锁反应。

**网状网络** 如图 (c) 所示，任一节点均有两条以上的输电线（或两个方向以上的并联输电线）与之相连。输电线路的容量同样须满足网络正常及非正常方式下的输电要求，但由于每一节点上的输电线路数比环状网络的多，因连锁反应而导致不必要跳闸的可能性小，故其可靠性比环状网络的还要高。网状网络的节点间联系紧密，输入阻抗及转移阻抗小，网络的短路容量水平高，有时会对断路器提出较高的要求。

**链状网络** 如图 (d) 所示，网络中各输电线路通过节点首尾相连。每一条输电线（或每一方向的几条并联的输电线）的输电容量取决于相连节点的电源出力和负荷水平以及相邻线路的潮流。

**输电线路性质分类** 按其重要性及其在输电网络

shudian wangluo

**输电网络** (transmission network) 由若干输电线路组成的将许多电源点与许多供电点连接起来的网络体系。输电网络是按电压等级划分层次，组成网络结构，并通过变电所与配电网连接，或与另一电压

中所起的作用不同,可分为输电干线、连接线和联络线三类。

**输电干线** 主要电力输送通道上的输电线路,它的开断或故障会导致整个网络运行状况的恶化,甚至造成连锁反应。若干输电干线连接成为骨干网络,或称网架。保证输电干线以及骨干网络的安全运行,是整个电力网安全运行的关键。形成一个坚强的网架,是电力网建设的基础措施。

**连接线** 非主要电力输送通道上的输电线路,它的开断或故障不会影响整个网络的运行,甚至并不导致电力网局部停电。这种线路形成的原因有:①由于可靠性原因而架设;②由于经济性原因而架设;③由于局部潮流平衡而架设;④由于电力网发展,使原来的输电干线的重要性降低而形成的。

**联络线** 连接两个或多个电力网的线路。联络线在电力网正常运行时的作用是调剂电力网间的电力余缺,合理使用能源,实现经济运行;在电网故障时的作用是相互支援,减小停电范围以及易于恢复供电。联络线除正常时即有大量输送电力时外,一般故障开断不会引起所联电力网的运行困难。连接两个大容量电力网的联络线上的功率往往会有振荡。造成这种功率振荡的原因有:①电力网间的调频误差;②自动调节装置的随机扰动;③电力网操作引起潮流变动;④负荷的随机波动;⑤电力网弱阻尼以至负阻尼。所以,联网宜于强联系。

**地区网络性质分类** 大型输电网络是由主干电网(简称主网)和若干地区电网相连组成。被接入主网的地区网络的性能与输电网络的运行有密切关系。地区网络按其在电力网中所处位置不同,一般可分为送端电网、中间电网和受端电网三类。地区电网的送端、中间、受端之分是相对的,会随着电网的发展而改变。因此,注意地区电网的这种变化而随之改变和加强地区电网,是十分必要的。

**送端电网** 有大量电源并以向主网输出电力为主的地区网络。它与主网的联网点通常为地区主力电厂的最高一级电压母线。送端网络的结构薄弱,地区电网的故障有可能波及主网,若主网结构不强,也有可能致全网稳定被破坏,造成事故扩大。

**受端电网** 以受电为主,本地区内有一定电源,处于主网一端的地区电网。大型输电网络往往有多个受端电网。受端电网联网点通常要满足以下技术要求:①电力吞吐灵活、方便;②有足够的电压支持能力;③地区网络与主网的联系阻抗要小等。适宜的联网点通常是地区电网的枢纽变电所。地区主力电源点虽有电压支持能力,但不宜选作联网点,因为所受电力会加大地区主力电厂的出线潮流,造成潮流阻塞。若受端电网受

电比例过大(例如大于30%),在电网结构上要防止与主网突然断开的可能性。这种故障会造成地区电网因大功率缺额而产生负荷失稳,电压或频率崩溃。

**中间电网** 与主网有一定的电力交换,但并非处于主网送、受端的地区电网。中间电网的电压支持作用对主网的输送能力有较大影响。链状结构的主网,尤其需要中间电网的电压支持。主网振荡会造成中间电网的电压大幅度波动。中间电网的无功、电压调节能力强,有利于平息主网的功率振荡,反之则将导致中间电网稳定被破坏,进而加剧主网的振荡事故,以致全网瓦解。为了加强中间电网的电压支持作用,常采用中间无功补偿措施。

**输电网络的发展** 输电网络一般都是由薄弱到坚强逐步发展起来的。在网络形成初期,结构形式较为简单,单回路链状网络、单回路环状网络以及不同电压等级的线路,经变压器耦合成高低压电磁环状网络等,是常见的结构型式。这种网络的结构薄弱,其共同特点是可靠性差,故障波及范围大,故障恢复时间长。

网络结构薄弱是电网运行不安全的主要根源之一。结构薄弱的主要表现有:①网络主干线输送能力不够,易于失去稳定,发生功率振荡事故;②线路潮流不合理(如电磁环网),事故应变的灵活性差(如单环网络);③主网或地区电网电压支持能力较差;④网络结构与电源分布不相适应,大量电源未接入主网,而是接入低一级电压网络或地区电网,正常运行中可能发生电源送不出的窝电现象,主网故障时由于潮流阻塞而失去支援能力;⑤地区电网与主网的联系阻抗大,电压支持能力差。

加强电网结构,避免产生连锁反应、稳定破坏、频率或电压失控等造成大面积停电的危险,是电网建设中的重要课题。大电源的接入,地区电网的联网和高一级电压等级的出现等,是电网发展的重要契机。利用这些机会,增强网络结构,是电网规划设计的主要任务之一。

大电源接入电网,应视电源容量大小而选择接入电网中相应的电压等级和接入地点,避免电网短路容量过大,电力调度不灵活和潮流阻塞等缺点。

(费翔群)

shudian xianlu cichang

**输电线路磁场** (magnetic field of transmission line) 输电线路运行时导线中流动的负荷电流在周围广大空间产生的工频磁场。三相输电线路周围空间任一点的工频磁场与工频电场(见输电线路电场)相似,亦为一旋转场,可用一旋转矢量来表示。矢量的大小和方向随时间的不同而改变,它在某一

方向有一最大值,垂直于最大值方向有一最小值。该矢量的旋转轨迹为一椭圆,一般用与最大磁感应强度  $B_{\max}$  及最小磁感应强度  $B_{\min}$  成比例的两个矢量来表示。磁感应强度又称磁通密度。工程上常用磁感应强度的垂直分量和水平分量来表征空间某点的工频磁场。

根据对不同电压等级输电线路工频磁场的实际测量,获知 500 kV 输电线路下地面附近的磁感应强度仅为 0.05 mT,而彩色电视机或电炊事用具附近的磁感应强度约为 0.5~1.0 mT,所以输电线路下地面附近的磁场是不致对人身产生生态影响的。但在与输电线路平行的长形导体上(如对地绝缘的金属栅栏、电信线、广播线、对地绝缘的金属管道等),会感应出电动势,从而产生不良影响。

屏蔽工频磁场要比屏蔽工频电场困难得多,原因是工频磁场很容易穿透大多数物体如建筑物等,而且磁场中的物体对磁场的畸变比对电场的畸变要小。

输电线路磁场计算 计算输电线路工频磁场和计算工频电场的方法类似,也可用镜像电流来代替地中的分散电流,所不同的是镜像电流的位置一般距地面很深,其深度  $d$  由下式决定

$$d=660\sqrt{\frac{\rho}{f}},\text{ m}$$

式中  $\rho$  为大地电阻率,  $\Omega\cdot\text{m}$ ;  $f$  为交流电频率, Hz。由于镜像电流很深,故在很多情况下可不考虑镜像电流的存在,只考虑空间导线电流的效应即可。计算时先按各相导线的电流,算出空间某点磁感应强度的垂直分量和水平分量,然后再进行合成,合成时不能单纯按矢量相加原则处理,还应考虑它们之间的时间相角差。

输电线路磁场测量 测量输电线路下面三相工频磁场的常用方法有:①交流电压表法。该法是用一个线圈探头连接交流电压表以测量磁场的磁感应强度。线圈探头实际是个多匝线圈,测量时将其置于被测的磁场中,由于交变的磁通穿过探头线圈而在线圈的两端头感应出一电动势。根据该电动势及其他相关参数便可算出相应的磁通量,从而确定磁场的磁感应强度大小。②特斯拉(或高斯)计法。该法是按半导体在磁场中的霍尔效应原理,用霍尔探头及电流表、电压表直接测量磁场的磁感应强度。测量时将装有矩形片状半导体霍尔元件的霍尔探头置于被测的磁场中,使交变的磁通穿过霍尔元件平面。当在垂直磁通的方向对元件通以电流时,则会在元件与磁通、电流均互为垂直的方向上感生出霍尔电压。根据该电流、电压及其他相关参数便可算出相应磁场的磁感应强度大小。

(邵方殷)

shudian xianlu daidian zuoye  
输电线路带电作业 (live line maintenance)

为必须不间断供电而在带电的输电线路上进行的维修工作。带电作业能及时地消除设备缺陷,提高供电可靠性。由于带电作业人员经过专门训练,使用特殊的工具,按照科学的程序作业,保证人体与带电体及接地体之间不形成危及人身安全的电气回路。另外,带电作业还有对强电场的防护措施,为作业人员提供了无害和良好的工作环境,使有些带电作业项目的工效已赶上或超过了停电作业的水平。带电作业方法按作业人员自身电位特征的不同,可分为间接作业法、等电位作业法和中间电位作业法三种。另外还有分相接地、全绝缘、带电水冲洗等具体作业方法。

间接作业法 人体与接地体同处于地电位的作业方法,又称地电位法。接触方式为接地体-人体-绝缘体-带电体。如图 1 所示,作业人员使用绝缘工具间接触及被修理的带电设备

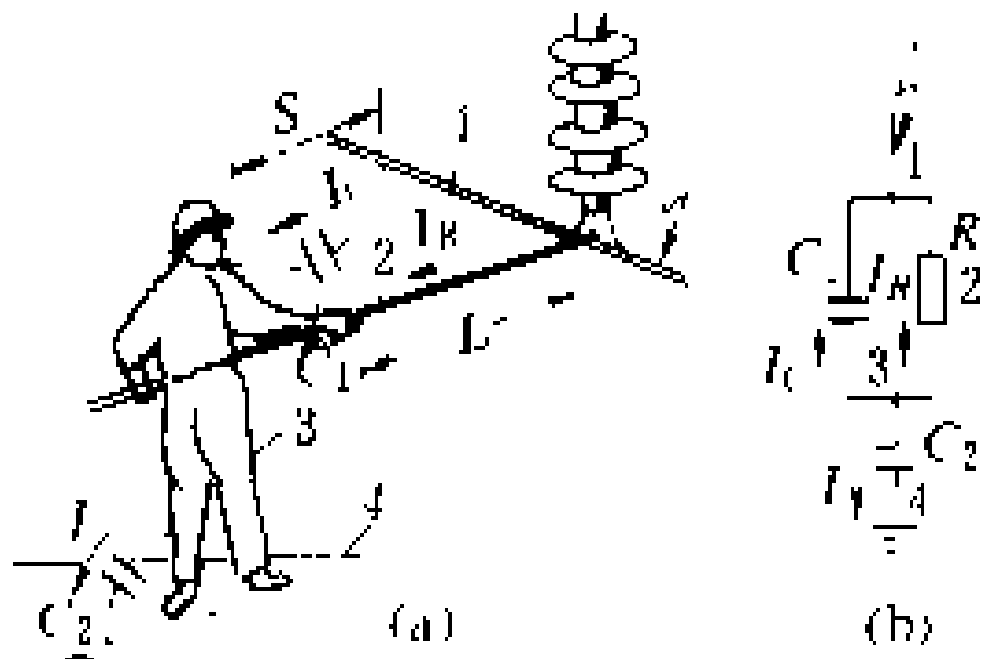


图 1 间接作业法

时,只有极微弱的泄漏电流  $I_R$  和通过空气介质产生的电容耦合电流  $I_C$  流经人体。作业人员穿的鞋使人体与大地构成容抗极小的电容,因而人体的电位并非绝对等同于大地。只要保证有足够长的有效绝缘距离  $L$  和安全距离  $S$ ,流经人体的电流就能限制在几十至几百微安以下,低于人体对工频交流电的感知水平(1 mA)。通常情况下,由于间接作业人员对带电体有足够的安全距离,且附近又有接地体屏蔽,作业人员身体表面场强较低,即使不采用电场防护措施,也能保证安全地工作。间接作业法是带电作业的最基本方法,广泛使用于 10~220 kV 线路上更换各类绝缘子,在 10 kV 线路上更换跌落式熔断器、横担及接引工作。

等电位作业法 人体通过绝缘工具与接地体隔断,保持人体与带电体电位相等的作业方法。接触方式为接地体-绝缘体-人体-带电体。如图 2 所示,作业人员可直接接触及带电设备,作业时除要求保证足够长的有效绝缘距离  $L$  和安全距离  $S$  外,由于等电位作业人员的身体表面场强已大大超过人对电场的感知水平(2.4 kV/cm),使肌体产生毛发竖立、风吹、异声及针

刺等不良感觉,故必须采取良好的电场防护措施,如穿戴包括帽子(面罩)、上下衣、鞋(袜)及手套的全套屏蔽服,使屏蔽服内的体表场强减弱到 0.15 kV/cm

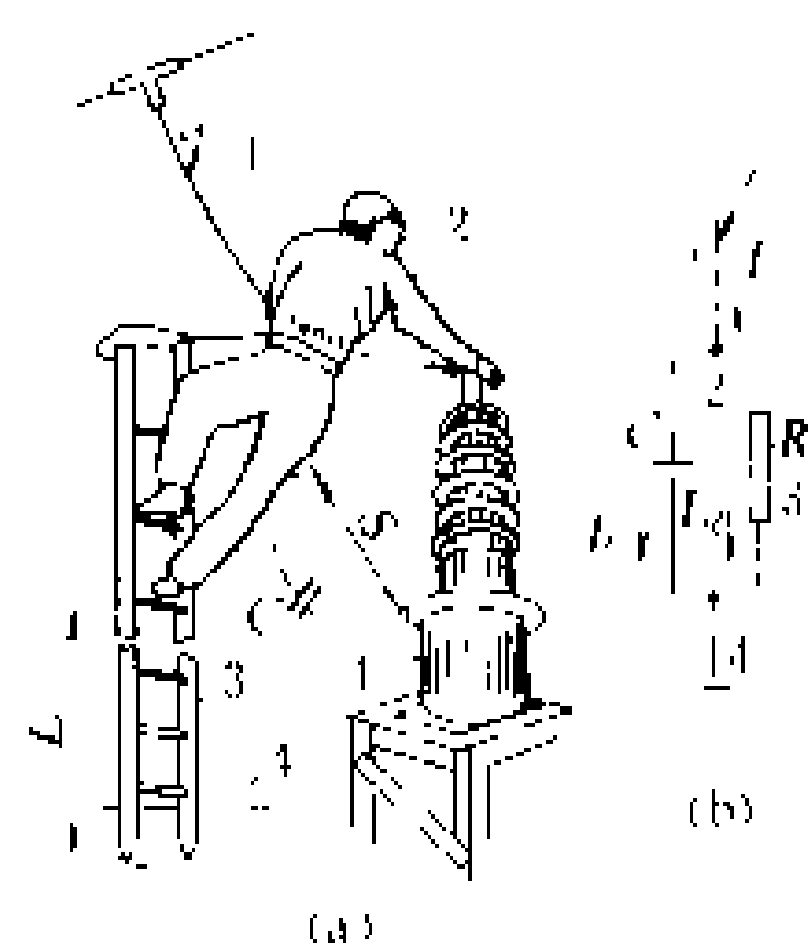


图 2 等电位作业法  
(a)等电位作业示意图;(b)等值电路图  
1—带电设备;2—作业人员;  
3—绝缘梯;4—接地体; $C$ —人  
体对地电容; $R$ —绝缘梯的等值  
电阻

以下,以保证等电位作业人员安全舒适地工作。绝缘工具的泄漏电流  $I_R$ 、人体对地电容电流  $I_C$  及电位转移操作时的暂态电流  $i_C$ ,均被导电性能良好的屏蔽服分流绝大部分,真正流经人体的电流反倒低于间接作业人员的体电流水平。因此,只要设备间距较大,国内外都趋于采用等电位作业方法。等电位工作人员可从事各种复杂的维修工作,例如带电巡视、修补导线,徒手处理电气接点

故障,调整导线弧垂,更换各类绝缘子等。参见彩图插页第 5 页 16 图和第 6 页 21 图。

**中间电位作业法** 作业人员与接地体和带电体均保持一定的电位差,可直接接触及与自己电位相同的设备,或通过绝缘工具间接触及高于自身电位的设备的作业方法。接触方式为接地体-绝缘体-人体-绝缘体-带电体。中间电位作业法的显著特征是它的有效绝缘和空气间隙均由两部分组合而成。这种组合绝缘和组合空气间隙的放电电压低于原先的单一绝缘和单一空气间隙的放电电压,因此在安全上有特殊的要求。中间电位状态下的作业人员因其体表场强也较高,一般都必须穿着全套屏蔽服才允许工作。作业中的各种电流也都经屏蔽服分流。图 3 (a) 所示的沿绝缘子串进入强电场直接更换单片绝缘子的工作,是中间电位作业法的典型项目。中间电位作业法工效较高,已在 330 kV 和 500 kV 电力网中采用,除此而外,还使用于全绝缘作业及间接更换长串绝缘子的个别元件等项目中。参见彩图插页第 6 页 20 图。

**分相接地作业法** 将需维修的带电设备单相人为接地,使作业人员与设备同处于地电位进行检修的作业方法。分相接地作业仅在中性点非直接接地系统中采用,而且常常是在设备已发生单相接地故障时使用。这种带有抢修性质的工作方法能较快地消除故障,但一相接地后会使其其他两相设备的工作电压升高到  $\sqrt{3}$  倍,容易诱发相间故障,且干扰附近电信线,故该法实际应用极少。

**全绝缘作业法** 作业人员穿着由绝缘帽、绝缘衣裤、绝缘靴及绝缘手套组成的绝缘服,在有各种绝缘档板和护罩遮蔽好的带电设备上上进行维修的作业方法。从原理上看,全绝缘作业法属于中间电位作业法,接触方式也为接地体-绝缘体-人体-绝缘体-带电体。绝缘服是保证人身安全的主绝缘,各种隔离措施是保证人身及设备安全的辅助绝缘。采用全绝缘作业,人体对带电体的安全距离可进一步缩短,全绝缘作业法多应用于 10 kV 屋内配电装置的维修,例如处理接点发热、更换母线支柱绝缘子等。

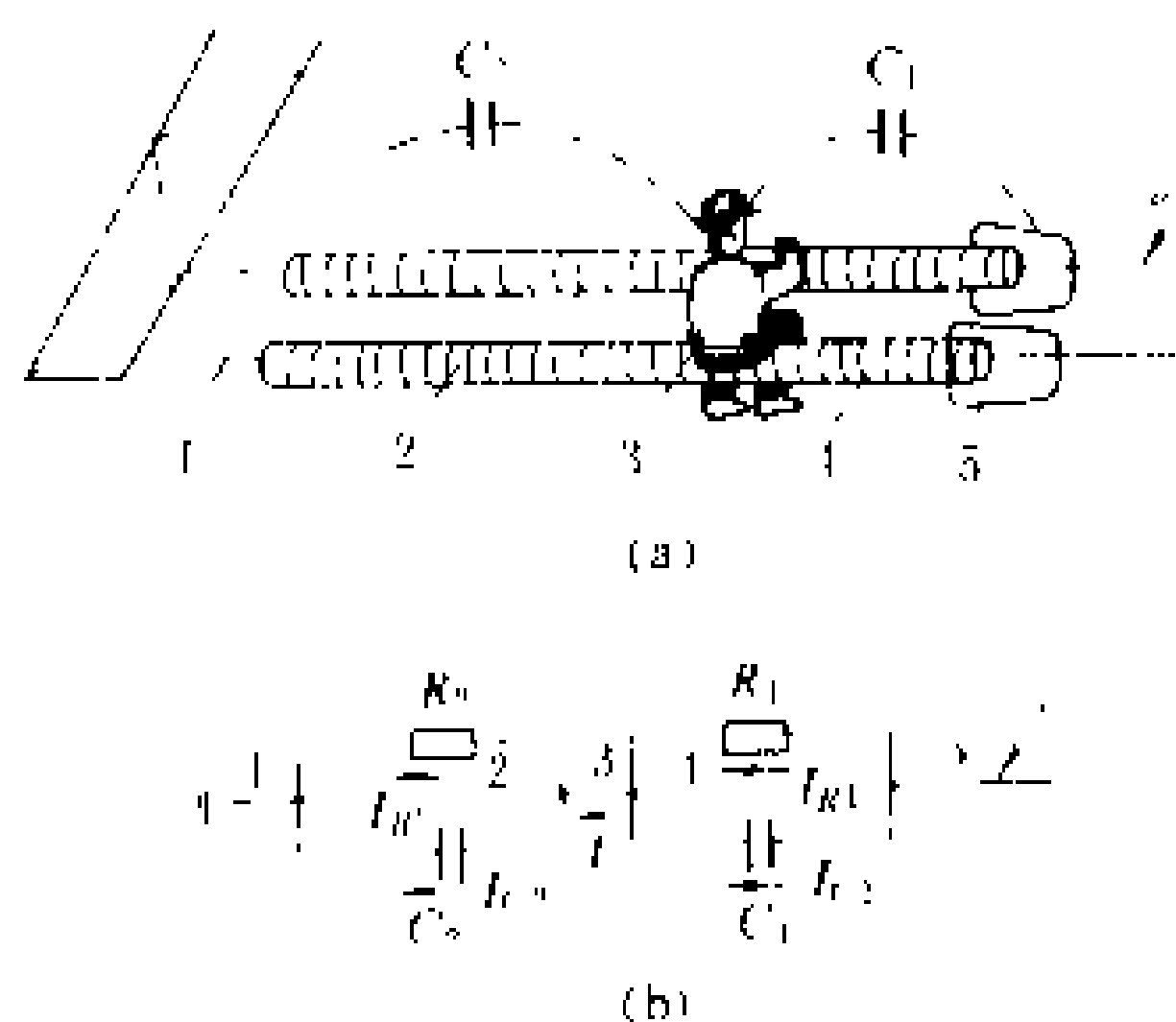


图 3 中间电位作业法

(a)沿绝缘子串进入强电场更换单片绝缘子示意图;

(b)等值电路图

1—接地体;2—后部绝缘;3—工作人员;4—前部绝缘;  
5—带电均压环; $C_1$ 、 $C_2$ —人体对带电体和接地体的等值  
电容; $R_1$ 、 $R_2$ —两部分绝缘子的等值电阻

**带电水冲洗** 使用符合技术标准要求的水流,在严格控制喷嘴口径、水柱长度、水压及水电阻率等参数的条件下,对污秽的带电绝缘瓷件进行冲洗的作业。冲洗中流经操作者的电流应严格控制在 1 mA 以下,同时被冲洗绝缘瓷件的原有等值附盐密度应在安全值以内,以防止发生人身事故和冲洗设备闪络事故。带电冲洗人员须严格遵循冲洗角度、冲洗顺序的有关规定,注意掌握安全气象条件(风速、风向、气温等)和冲洗用水的质量。带电水冲洗作业已在中国部分地区开展,有大、中、小三种冲洗工艺。能冲洗 10~220 kV 输电线路及变电所除阀式避雷器、渗漏油瓷套管等以外的所有屋外绝缘瓷件。带电水冲洗的清扫质量和工效都较好,已作为防污闪事故的常规措施之一。(见变电所带电水冲洗)

**绝缘材料和工具** 带电作业常用的绝缘材料有板材、管材、棒材、绳索、绝缘膜、绝缘漆及粘合剂等。板材包括硬质和软质两类,常用的有 3240 环氧酚醛玻璃布平板、异形板、蜂窝板,还有聚乙烯、聚氯乙烯软质及硬质板。管材也包括硬质和软质两类,有 3640 环氧酚醛玻璃布管、玻璃丝管、泡沫填充管、玻璃钢管。

管型分圆管、椭圆管、矩形管、锥形伸缩管等。还有聚乙烯和聚丙烯软、硬质管及有机玻璃管等。棒材有3840环氧玻璃布棒、玻璃纤维引拔棒、尼龙棒及塑料棒。绳索有尼龙绳和蚕丝绳两大类,尼龙绳有复合丝和棕丝之分,蚕丝绳有家蚕丝和柞蚕丝之分,绳索的外形有绞制圆绳、编织圆绳、扁带、环状带、搭扣带等不同品种。

带电作业工具分绝缘工具和金属器具两大类共13个系列:绝缘承力工具、牵引机具、固定器、绝缘操作杆具、通用小工具、载人工具、屏蔽服、载流及断接引工具、清扫工具、绝缘遮蔽器具、绝缘服、带电作业工程车、雨天作业工具。

安全技术 为保证带电作业的人身及设备安全,须采取各种防护措施,如过电压防护、强电场防护、电流防护等,并规定各种安全限值要求。

(1) 过电压防护措施。带电作业中出现最大过电压时,需采取措施以保证人身安全的相对地安全距离 $S_{L-g}$ 、相间安全距离 $S_{L-L}$ 、绝缘工具的最低有效长度 $L$ 、安全组合间隙 $S_{ZH}$ 、人体在绝缘子串附近工作时需保持的良好绝缘子片数 $N$ 、等电位作业中电位转移距离等的安全限值,保证设备安全的爆压安全气隙和导线交叉跨越距离的安全限值。中国规定的不同电压等级下的各安全限值数值如表中所列。在不能保证这些安全限值要求时需采取各种补救措施。

带电作业时保证安全的各种限值

安全限值 电压等级 (kV)	相对地 安全距离 $S_{L-g}$ (m)	相间 安全距离 $S_{L-L}$ (m)	组合 安全距离 $S_{ZH}$ (m)	绝缘 有效长度 $L$ (m)	良好绝缘 子片数 $N$ (片)	爆压 安全气隙 $D_{L-g}$ (m)	电位 转移距离 $S_b$ (m)	斗臂车 臂长 $l$ (m)
10	0.4	0.6	—	0.4 (0.7)*	—	2.0	—	1.0
35	0.6	0.8	0.7	0.6 (0.9)	2	2.0	0.2	1.5
63	0.7	0.9	0.8	0.7 (1.0)	3	2.0	0.2	1.5
110	1.0	1.4	1.2	1.0 (1.3)	5	2.5	0.3	2.0
220	1.8	2.5	2.1	1.8 (2.1)	9	3.0	0.3	3.0
330	2.6	3.5	3.1	2.8 (3.1)	16	3.5	0.4	—
500	3.6	5.0	4.0	3.7 (4.0)	23	5.0	0.4	—

\* 括号内特指操作杆, 括号外为一般绝缘工具及绳索。

(2) 强电场防护措施。包括各种带电作业方式的强电场防护措施、防静电对策, 电位转移方式及等电位作业对杆塔净空距离的特殊要求。

(3) 电流防护措施。对各种泄漏电流、旁路分流、空载设备充放电电流、环网设备流过环流的防护措施, 消弧断流设备的应用范围及允许工作电流。

(4) 气象因素。温度、湿度、风力、雷电、雨、雪、雾等气象条件对带电作业安全的影响和相应的防护措施。

历史、现状及发展趋势 1913年, 美国最先成功研究345 kV线路带电作业工具。中国带电作业始于1953年, 现已在全国10、35、110、220、330 kV电力网中应用, 并已在500 kV交、直流电力网中开发了不少带电作业项目。目前, 世界上已有80多个国家开展了带电作业的研究与应用, 其中美国、加拿大、苏联、日本、法国、英国、德国、瑞士及意大利等40多个国家已广泛应用带电作业技术。美国获专业合格证的带电作业人员达13000余人, 且在765kV输电线路开

展了带电维修工作, 目前正在开发1200kV系统的带电作业项目。1975年国际电工委员会(IEC)在海牙市成立了带电作业工具备技术委员会(IEC-TC18)。1977年成立了“国际带电作业技术交流会”。带电作业工具设计标准化和生产专业化, 是国际带电作业发展的特色。不少国家还注重带电作业机械化的研究, 现已研究出更换绝缘子的机械手, 供升降作业人员的牵引机械、绝缘子水冲洗、气洗、干扫专用设备。近些年来, 国外还就带电作业涉及的人类工程学及生物问题开展了研究工作, 旨在进一步减轻作业人员的疲劳程度。

参考书目

柏克塞等, 带电作业, 修订版, 北京: 水利电力出版社, 1988

(方年安)

shudian xianlu daoxian huanwei  
输电线路导线换位 (conductor transposition

of transmission line) 变换输电线路三相导线的空间位置,以减少电力系统在正常运行情况下电流和电压的不对称性。交流架空输电线路的三相导线,在空间的排列位置是不对称的,特别是三相导线呈水平排列的线路,不对称程度更大。由于三相导线在空间的位置不对称,导致各相导线的电容和电感值不同,即各相的阻抗和导纳不相等,这就引起了负序和零序电流。过大的负序电流会引起电力系统内电机的过热。而零序电流超过一定数值时,在中性点不接地的系统中,有可能引起灵敏度较高的接地继电器的误动作。输电线路的电流和电压的不对称,也可能对电信线路产生干扰影响。输电线路导线换位的结果,是使在一条线路上各相导线处在某一空间位置的长度分布尽量接近,这样各相参数的差异就会缩小,电流和电压的不对称性也能够控制在一定限度之内。经过位置变换三相导线又恢复到原来的相序排列,称为一个换位整循环。换位循环的典型布置如图1和图2所示,其中图1为一条线路进行一个换位整循环,图2为一条线路进行两个换位整循环。进行几次整循环换位视线路的长度而定。

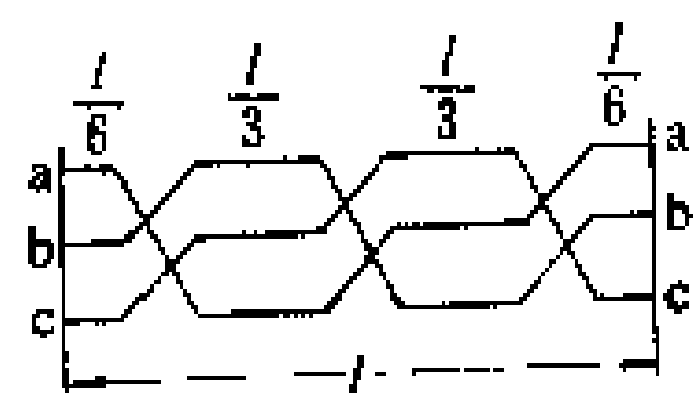


图1 一个换位循环布置

$l$ —线路的长度

变换输电线路三相导线的空间位置,以减少电力系统在正常运行情况下电流和电压的不对称性。交流架空输电线路的三相导线,在空间的排列位置是不对称的,特别是三相导线呈水平排列的线路,不对称程度更大。由于三相导线在空间的位置不对称,导致各相导线的电容和电感值不同,即各相的阻抗和导纳不相等,这就引起了负序和零序电流。过大的负序电流会引起电力系统内电机的过热。而零序电流超过一定数值时,在中性点不接地的系统中,有可能引起灵敏度较高的接地继电器的误动作。输电线路的电流和电压的不对称,也可能对电信线路产生干扰影响。输电线路导线换位的结果,是使在一条线路上各相导线处在某一空间位置的长度分布尽量接近,这样各相参数的差异就会缩小,电流和电压的不对称性也能够控制在一定限度之内。经过位置变换三相导线又恢复到原来的相序排列,称为一个换位整循环。换位循环的典型布置如图1和图2所示,其中图1为一条线路进行一个换位整循环,图2为一条线路进行两个换位整循环。进行几次整循环换位视线路的长度而定。

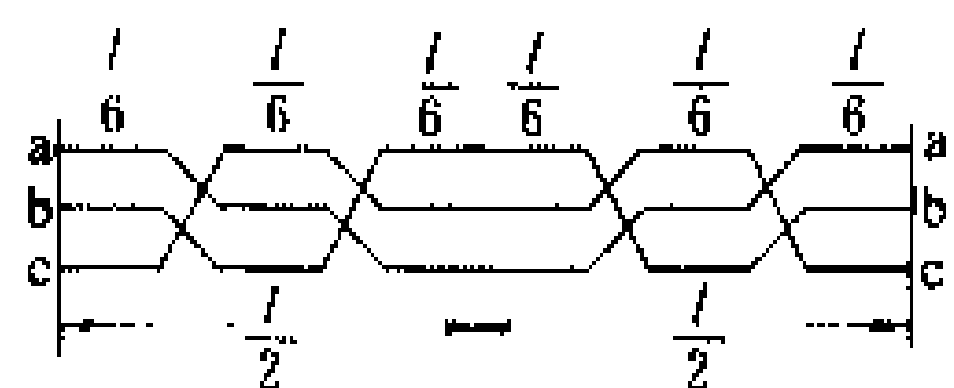


图2 两个换位循环布置

$l$ —线路的长度

跳线交叉换接,完成三相导线的位置变换。如图4所示,这种换位在杆塔上实现,可以避免导线在档距中交叉。但杆塔上绝缘子串增多,跳线布置比较复杂,施工安装和运行检修不如直线换位简便,间隙验算也比较复杂。

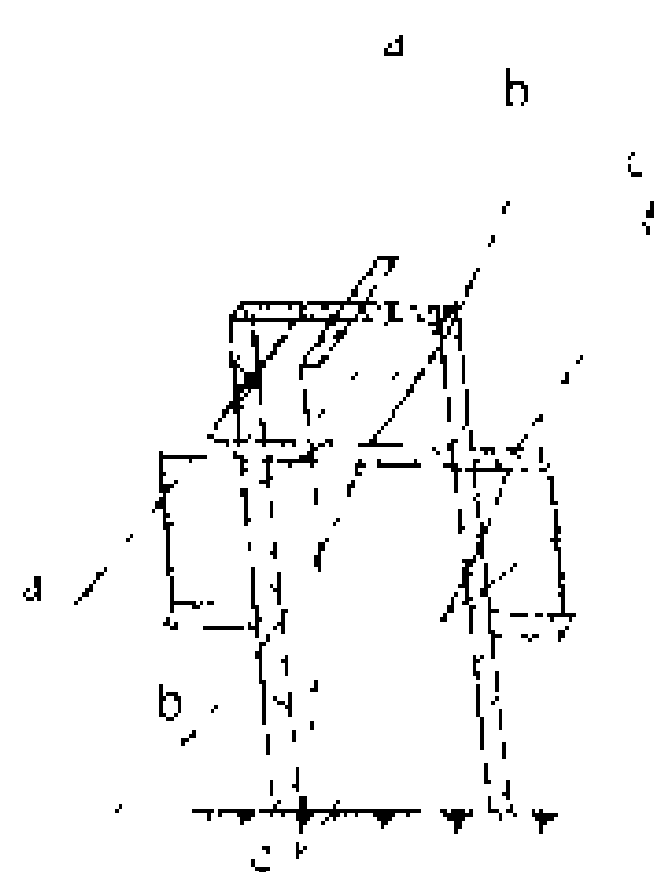


图4 耐张换位

然后通过一组特殊的跳线交叉跳接以完成三相导线位置的变换。如图5所示,这种换位方式不需要特殊设计杆塔,只需利用一基常规的耐张型杆塔,且导线在档距中不交叉,跳线的位置也比较清晰。不过为换位而特殊串接的绝缘子串是承受相间电压的,应选择具有相应的绝缘强度,而且串接的一组绝缘子串和跳线距杆塔有一段距离,安装和检修比较困难,需要采取特殊的施工措施。

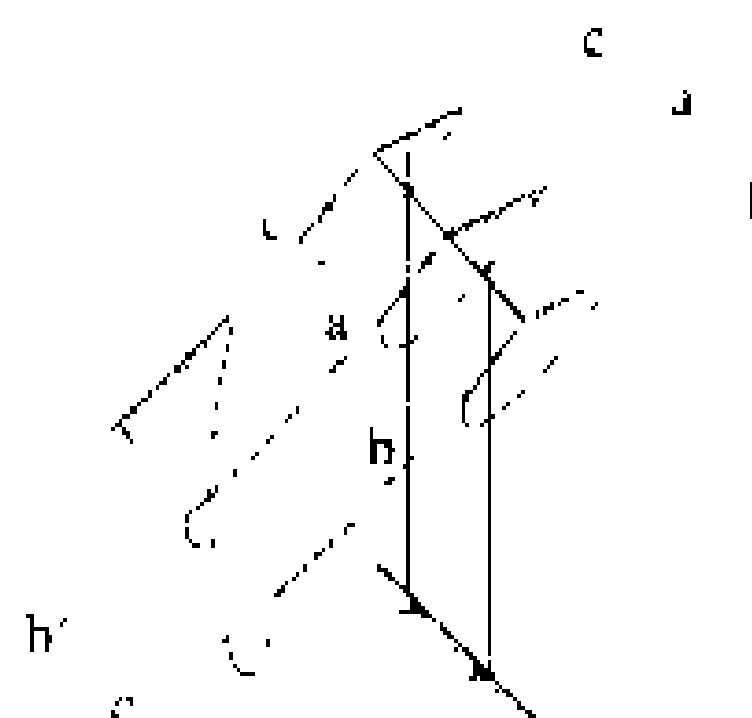


图5 悬空换位

(4)附加旁路跳线架换位。利用干字型耐张塔或转角塔并在其近旁附设一组小型架构,架一小段旁路导线转接跳线,通过跳线换接进行导线换位。如图6所示,这种换位方式虽然增加了旁路导线和架构,但其布置清晰,施工安装并不困难,特别是用于超高压输电线路,运行安全可靠。

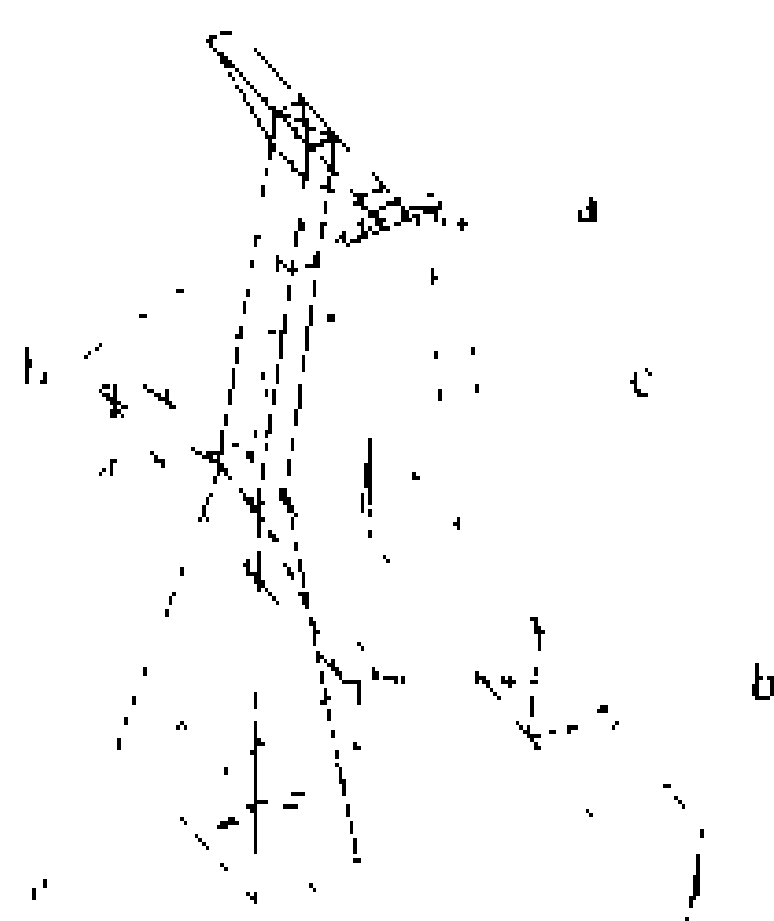


图6 附加旁路跳线架换位

运行安全可靠。

换位循环长度 早期建设的输电线路一般都认为导线换位应尽可能多些,以使线路参数更加对称均衡,减少电流和电压的不对称性,避免对电信线路产生干扰。中国曾规定:导线三角排列的输电线路,一个换位整循环的长度一般不超过48 km;其他排列方式的线路,尽量不大于24 km。但是设计计算分析和运行实践经验表明,换位是输电线路的薄弱环节,换位过多不但增加线路建设投资和运行维护费用,而且会削弱线路



图3 直线换位

(2)耐张换位。利用特殊设计的耐张型杆塔,通过

的电气和机械强度,降低安全运行的可靠性。经过对电信线路干扰问题的深入研究,认识到导线换位对减少干扰实际上不起多大作用。输电线路对电信线路的电磁干扰和静电影响,主要是由于电力系统中各个元件的非线性以及发电机不对称运行时加在线路上的高次谐波电流和谐波电压所引起的。在通常情况下,输电线路与电信线路间的距离比输电线路导线间的距离以及导线对地距离要大得多,输电线路的静电场在通信线处是很小的,对通信线路所产生的静电干扰影响是很轻微的。最大的静电干扰,可能是由电压谐波的零序分量所引起的,但在正常的全相运行方式时其值也很小。至于谐波电流所引起的电磁干扰,各对称分量的影响是不同的。正序和负序电流不直接流入大地,随着输电线路和电信线路相对距离的增大,由正序和负序电流引起的电磁影响急剧衰减,到电信线处实际几乎已没有影响。只有谐波电流的零序分量流入大地,而且地中电流的等值深度可与输电线路和电信线路间的距离相比拟。但是也只有基波的零序电流值才直接与换位循环长度有关系,并且它对电信线的干扰影响也是很微小的。

输电线路换位循环长度实际上并不取决于对电信线的干扰影响,而是取决于电力系统内所容许的电流和电压的不对称度。在选择输电线路换位循环的长度时,要针对线路在建设和运行中的具体条件进行计算,以估计延长换位循环所引起的电流和电压不对称度是否超过容许值,同时要研究是否采取比增加导线换位更为合理的其他消除不对称的措施。换位循环长度的选择应从电力系统的整体考虑,并为系统发展留有适当余地,不能单纯的仅仅计算某一条线路的局部情况。对于长线路,由于具有很大的电容电流,每个换位距离中各相参数和相间参数的差别比较大,所引起的电流和电压的不对称是经常起作用的。计算表明:线路长度在100 km以下可以不进行导线换位;两个变电所之间的长度在200~250 km左右,进行一个换位整循环,电流和电压的不对称一般不会超过容许值;对于500 kV线路,换位循环的长度可增大到300 km左右。

(黄志明)

shudian xianlu daoxian jianian xuanze

输电线路导线截面选择 (selection of conductor cross - section of transmission line)

导线是架空输电线路的主要元件之一,在架空输电线路建设投资中占有很大的比重。导线截面选择过大,不仅增加有色金属的消耗量,还显著增加线路的建设投资。导线截面选择过小,则运行时导线中的电压和电能损耗加大,使电能传输质量和运行经济性变差。因

此,正确选择导线截面,对电力网建设、运行经济性和技术合理性都具有重要意义。

输电距离较短的高压输电线路的导线截面,一般按经济电流密度初步选定,用发热条件和电晕条件进行校验。超高压和特高压长距离输电线路的导线截面,还要再用无线电干扰条件和电晕噪声条件加以校验。

按经济电流密度选择导线截面

**导线经济电流密度** 与输电线路总费用最小或不但总费用最小且投资效果最佳的导线经济截面相对应的电流密度。从降低导线功率和电能损耗的条件出发,导线截面越大越有利;从减小有色金属消耗量和降低建设投资出发,则导线截面越小越好。导线截面的大小从相反方面影响着输电线路运行费用和建设投资,只强调某一方面而片面地增大或减小截面都是不适宜的。研究计算导线最佳截面有静态计算和动态计算两种不同观点。静态计算观点认为,使输电线路年运行费用或投资回收年限内总费用最小的导线截面即为经济截面。动态计算观点则认为,使在输电线路投资回收年限内不但总费用最小而且投资所发挥的经济效果最佳的导线截面才是经济截面。

静态计算 有最小年运行费用法、最小总费用法和凯尔文法。

(1)最小年运行费用法。年运行费用包括电能损耗(导线发热损耗和电晕损耗)费、折旧费和维护管理费。除维护管理费外,其他都随导线截面大小而变化。取使得年运行费用为最小的导线截面作为经济截面,从而导出的经济电流密度为

$$J = \sqrt{\frac{10ab}{3\rho\beta(\tau_{max} + 8760K_s)}}, A/mm^2 \quad (1)$$

式中a为线路折旧、修理费占建设投资的百分数;b为线路单位长度导线单位截面的造价,元/(mm<sup>2</sup>·m);β为销售电价,元/(kW·h);ρ为导线电阻率,Ω·mm<sup>2</sup>/km;K<sub>s</sub>为导线电晕损耗系数;τ<sub>max</sub>为线路最大负荷损耗时间,h。而τ<sub>max</sub>又随不同的年最大负荷利用小时数T<sub>max</sub>而不同。20世纪50年代,中国根据该方法在未计电晕损耗及适当节省建设投资和有色金属消耗的情况下制定的经济电流密度如表1。苏联在50年代根

表1 中国经济电流密度J(A/mm<sup>2</sup>)

导线材料	年最大负荷利用小时数 T <sub>max</sub> (h)		
	3000 以下	3000~5000	5000 以上
裸铜线	3.0	2.25	1.75
裸铝、钢芯铝线	1.65	1.15	0.9

据该法，在不计电晕损耗的情况下制定的经济电流密度如表 2。

表 2 苏联经济电流密度 J (A/mm²)

导线材料	年最大负荷利用小时数 T <sub>max</sub> (h)		
	3000 以下	3000~5000	5000 以上
铝绞线	2.5	1.75	1.25
钢芯、钢芯铝绞线	1.5	1.0	0.75

(2)最小总费用法。取使得线路建设投资与投资回收年限内总运行费用之和的总费用为最小的导线截面作为经济截面，从而导出的经济电流密度为

$$J = \sqrt{\frac{10\left(a + \frac{100}{T_n}\right)b}{3\rho\beta(\tau_{max} + 8760K_s)}}, \text{A/mm}^2 \quad (2)$$

式中 a、b、β、ρ、τ<sub>max</sub> 的含义与式 (1) 中的相同；T<sub>n</sub> 为投资回收年限。苏联在 70 年代根据该法修订的经济电流密度如表 3。表中分子应用于苏联的欧洲部分、外高加索、外贝加尔及远东地区，分母应用于中西伯利亚、哥萨克斯坦及中亚细亚地区。

表 3 苏联修订的经济电流密度 J (A/mm²)

导线材料	年最大负荷利用小时数 T <sub>max</sub> (h)		
	3000 以下	3000~5000	5000 以上
铝绞、钢芯铝绞	1.30/1.50	1.10/1.40	1.0/1.30

(3) 凯尔文法。英国、美国、日本把凯尔文法则引用到经济电流密度的分析中，认为线路建设投资与投资回收年限内的总运行费用相等时的导线截面是经济截面。但事实上建设投资并非完全与导线截面成简单正比关系，运行费用也并非完全与导线截面成简单反比关系。

动态计算 克服了静态计算不考虑利息、利润、税金、投资收益为零不能返本的缺陷，考虑输电线路建设投资与投资回收年限内总运行费用之和的总费用（包括为补偿线路能耗的补充装机投资），投运后获取的利润、贷款的付息、利润的税金以及货币的时间价值诸因素后，取总费用最小和投资经济效果最佳的导线截面作为经济截面，从而导出的经济电流密度为

$$J = \sqrt{\frac{1035\left(a + \frac{1}{T_n} + i + P_s\right)b}{3\rho\left[1.035K_nK_p\left(\frac{1}{T_n} + i + P_s\right) + \tau_{max}c\right]}}$$

式中的 a、b、ρ、τ<sub>max</sub> 含义与式 (1) 中的相同；K<sub>p</sub> 为发

电厂每千瓦的投资，元/kW；K<sub>n</sub> 为各线路最大负荷同时出现的系数；c 为发电厂的发电成本，元/（kW·h）；i 为贷款付息的利率；P<sub>s</sub> 为利润纳税的税率。中国在 20 世纪 80 年代根据该法修订的经济电流密度曲线如图 1 所示。

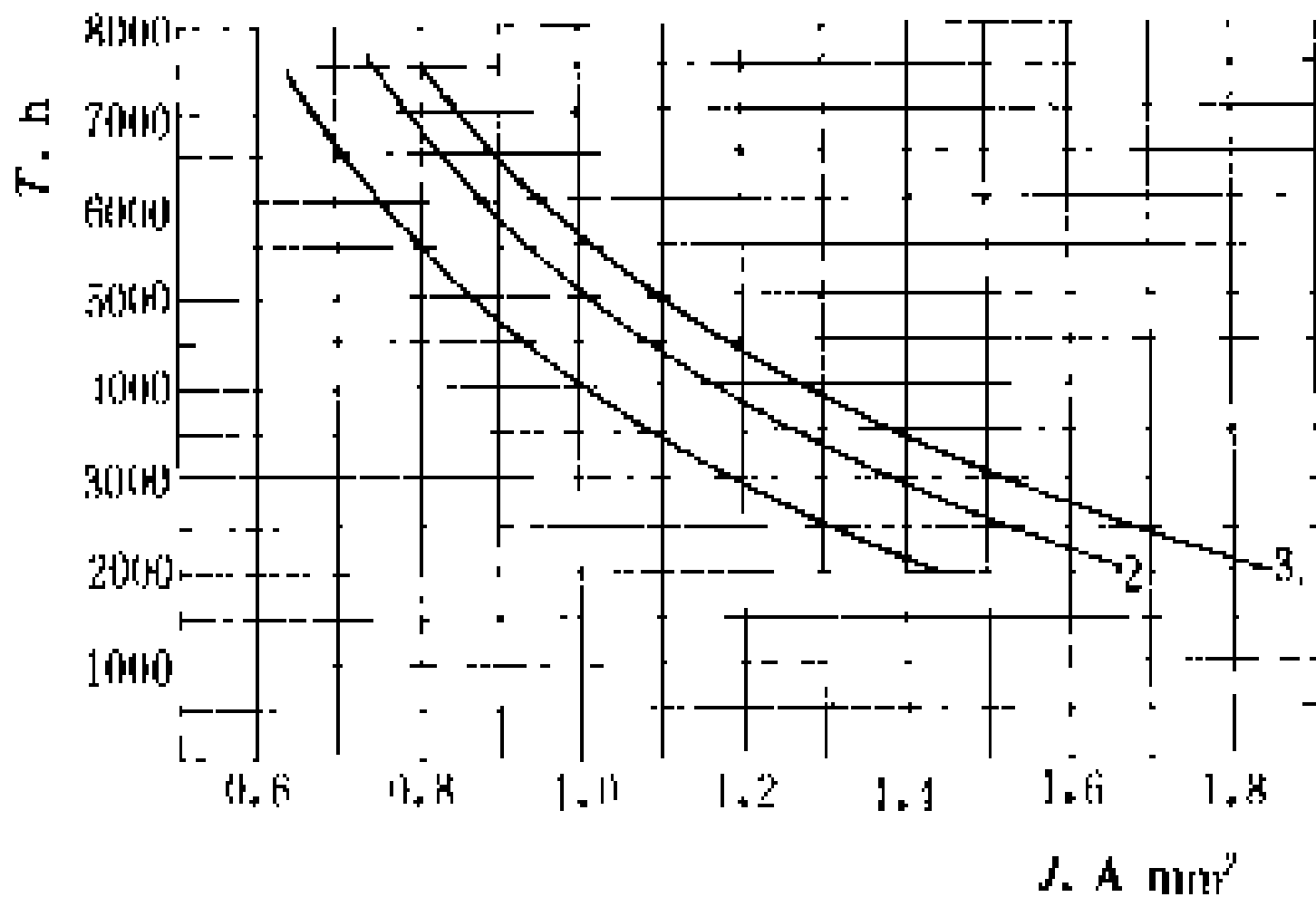


图 1 导线经济电流密度曲线

- 曲线 1：导线为 LJ 型，10 kV 及以下电力线路；
- 曲线 2：导线为 LGJ 型，10 kV 及以下电力线路；
- 曲线 3：导线为 LGJ、LGJQ 型，35~220 kV 电力线路

导线经济电流密度的确定是一个技术经济问题，与不同国家在不同国民经济发展阶段的经济政策及生产水平有密切的关系。因此，在不同的历史时期，往往须对原定的经济电流密度值作必要的修订，以期与当时的经济政策及现状相适应。

导线截面选定 按经济电流密度选定导线截面时，根据导线材料和由负荷性质推定的年最大负荷利用小时数 T<sub>max</sub>，选出相应的经济电流密度 J。为避免线路投运后长时间处于超设计负荷运行的不经济状态，一般取预测投运 5~10 年间发展情况的线路经常输送最大负荷电流 I<sub>max</sub> 初步选定导线的截面积 S。

按发热条件校验导线截面

导线长期允许电流 导线在最高允许工作温度下长期连续通过的电流。导线中通过电流时会产生电能损耗，使导线发热而温度升高，以致与周围空气产生温差，电流越大温差也越大。导线的工作温度越高，运行时间越长，由于金属受热退火作用，导线的强度损失就越大。导线的最高允许工作温度就是由导线强度损失情况决定的，因此按发热条件校验导线截面是决定导线截面的必要条件。导线截面趋向按运行 30 年、强度损失不超过 7%~10% 来规定其最高允许温度。中国根据这个原则确定导线最高允许温度是：钢绞线 125℃，钢芯铝绞线、铝合金绞线 80℃，钢芯铝包钢绞线 100℃，耐热铝合金绞线 150~200℃。

长期允许电流的计算 导线每秒钟产生的热量，由电流在导线电阻上的电能损耗转化的热量和自阳光



吸收的热量所组成，同时导线每秒钟向周围空气散发的热量，由辐射散热量和对流散热量所组成。导线长期允许电流就是根据最高允许温度时，导线每秒钟产生的热量与散发的热量相等的热平衡条件确定的。各国学者在确定长期允许电流时取用的计算方法和计算条件不尽相同，较著名的有苏联的 A. M. 萨列斯斯基法、英国的 V. T. 摩尔根法、美国的 H. E. 豪斯法和日本的电气协同研究会法，其中英国的 V. T. 摩尔根法考虑的因素最周详，且又有实验基础，因而在中国得到正式采用。当雷诺系数  $Re = vd/\nu$  ( $v$  为空气流速， $d$  为导线直径， $\nu$  为空气动力粘滞系数) 在 100~3000 范围时，中国将该法中的对流散热量计算简化为  $P_w = 9.92(t_m - t_a)(vd)^{0.485}$ , W/m；计算长期允许电流的条件取： $t_a = 40^\circ\text{C}$ 、 $t_m$  一般为  $70^\circ\text{C}$  或大跨越为  $90^\circ\text{C}$ （对钢芯铝绞线）、 $v = 0.5\text{ m/s}$ 。校核原则是初选导线的长期允许电流需大于系统事故运行方式下通过的最大电流。

按电晕条件校验导线直径

输电线路导线电晕的发生和发展机理，见输电线路电晕。由于导线表面光滑清洁程度不同，电晕并非同时在整个导线表面发生，而是随着电压的升高逐渐由局部扩展到全部表面，这种状态就称为全面电晕。开始出现全面电晕时的电压称为电晕起始电压或电晕临界电压，这时的导线表面电场强度称为电晕临界电场强度  $E_0$ 。

F. W. 皮克在晴朗天气下对光滑圆形导线的实验，得出光滑圆形导线的电晕临界电场强度幅值  $E_0 = 30.3\delta(1 + 0.3/\sqrt{R\delta})$ , kV/cm。其中  $R$  为导线半径(cm)； $\delta$  为相对空气密度，它与气压  $P$ (毫米水银柱高)、气温  $t(^{\circ}\text{C})$  的关系是  $\delta = 0.386P/(273+t)$ ，其大小与海拔高度直接相关。对于绞线，由于外层线股排列而成，使紧靠表面的电场畸变面强度增大，导致绞线的电晕临界电场强度较光滑圆形导线有所降低。工程上取晴朗天气时绞线的电晕临界电场强度为  $E_0 = 30.3m\delta(1 + 0.3/\sqrt{R\delta})$ ，其中  $m$  为绞线的表面系数或粗糙系数，它是绞线的电晕起始电压对光滑圆形导线的电晕起始电压的比值。根据苏联的实验，外层 10 股及以下的绞线  $m$  约为 0.82。外层 16 股的绞线  $m$  约为 0.85。 $E_0$  值与相对空气密度  $\delta$  成正比，亦即与海拔高度成反比。海拔高度对  $E_0$  值的影响较大。绞线半径  $R$  增大，虽使电晕临界电场强度有所降低，有利于全面电晕的产生，但影响并不显著。

运行线路导线的表面电场强度  $E(\text{kV/cm})$  是与线

路线电压  $U(\text{kV})$ 、相导线工作电容  $C(\text{pF/m})$  成正比而与相导线半径  $R(\text{cm})$  成反比的。

对于单导线线路，相导线表面各点电场强度相等，其幅值为  $E_m = 0.0147 \frac{CU}{R}$

对于分裂导线线路，相导线束外侧的表面电场强度大于内侧，其最大强度幅值为  $E_m = 0.0147 \frac{KCU}{nR}$

(4)

式中  $K$  为电荷分布不均匀系数，它与子导线半径  $R$ 、根数  $n$  及分裂间距有关。在相同线电压时，增大导线的直径便能减小导线的表面电场强度，其影响是显著的。

导线出现电晕后，不但引起有功功率损耗，同时对附近的无线电通信以及利用导线作高频通信的通道引起干扰，750 kV 及以上电压的架空线路导线电晕甚至引起严重的电晕噪声。所以选定高压乃至特高压架空线路的导线直径时，应按晴朗天气下不致发生全面电晕的条件进行校验，判据是要求  $E_m < E_0$ ，从而避免运行中导线产生全面电晕。苏联 330~750 kV 架空输电线路设计时取  $E_m/E_0 \leq 90\%$ 。中国对海拔小于 1000 m

表 4 按电晕条件允许的导线最小直径

电压等级(kV)	110	154	220	330		500	
导线最小直径(mm)	9.6	13.9	21.6	33.6	2×21.6	3×26.8	4×21.6
$\frac{E_m}{E_0}(\%)$	78.8	80.7	81.8	84.1	84.6	83.3	82.0

地区架空输电线路设计时取导线允许最小直径及相应的  $E_m/E_0$  值如表 4。

由于导线表面电场强度与线路电压成正比，因此随着线路电压的提高，按经济电流密度选定的相导线截面和按电晕条件、无线电干扰条件要求的相导线截面之间的差异变大，对于 330 kV 及以上电压的架空输电线路，实际上往往是电晕条件或无线电干扰条件、电晕噪声条件控制着相导线截面的选定。

按无线电干扰条件校验导线直径

虽然导线截面已按不出现全面电晕的条件校验，但由于超高压输电线路导线的表面电场强度均控制在电晕临界电场强度的 80% 以上，接近于电晕临界电场强度，而新架设导线表面的局部污损又导致导线电晕临界电压降低，故运行初期和在雨天情况下仍难免出现电晕。相导线上产生电晕放电时，要伴随着产生连续重复性的电流脉冲，这些电流脉冲产生频率为 0.15~



100 MHz 的振荡电磁波,致使在电晕导线上产生高频电磁辐射,从而在导线周围形成一高频电场,对无线电收音机和发射天线产生干扰。同时这种振荡电磁波还沿导线传播,干扰高频通道的正常工作。

由电晕导线产生的无线电干扰电平  $L=20\lg(E_2/E_1)$ ,dB。其中  $E_2$  为测点电场强度,  $\mu\text{V}/\text{m}$ ;  $E_1$  为参考电场强度,  $\mu\text{V}/\text{m}$ 。工程上取  $E_1=1\mu\text{V}/\text{m}$  为基准,故  $L=20\lg E_2$ 。若  $E_2=E_1=1\mu\text{V}/\text{m}$ ,则测点的无线电干扰电平为零。

从高压、超高压架空输电线路下测得的无线电干扰电平  $L(\text{dB})$  随频率  $f(\text{MHz})$  的增大而减弱,其关系曲线称为频谱特性,如图 2 所示。由频谱特性看出,频率在  $0.15\sim 1.0\text{MHz}$  范围内的干扰电平最大;雨天的干扰电平是各种气候中最大的。另外,随着海拔高度的增大,相对空气密度减小,干扰电平也增大。

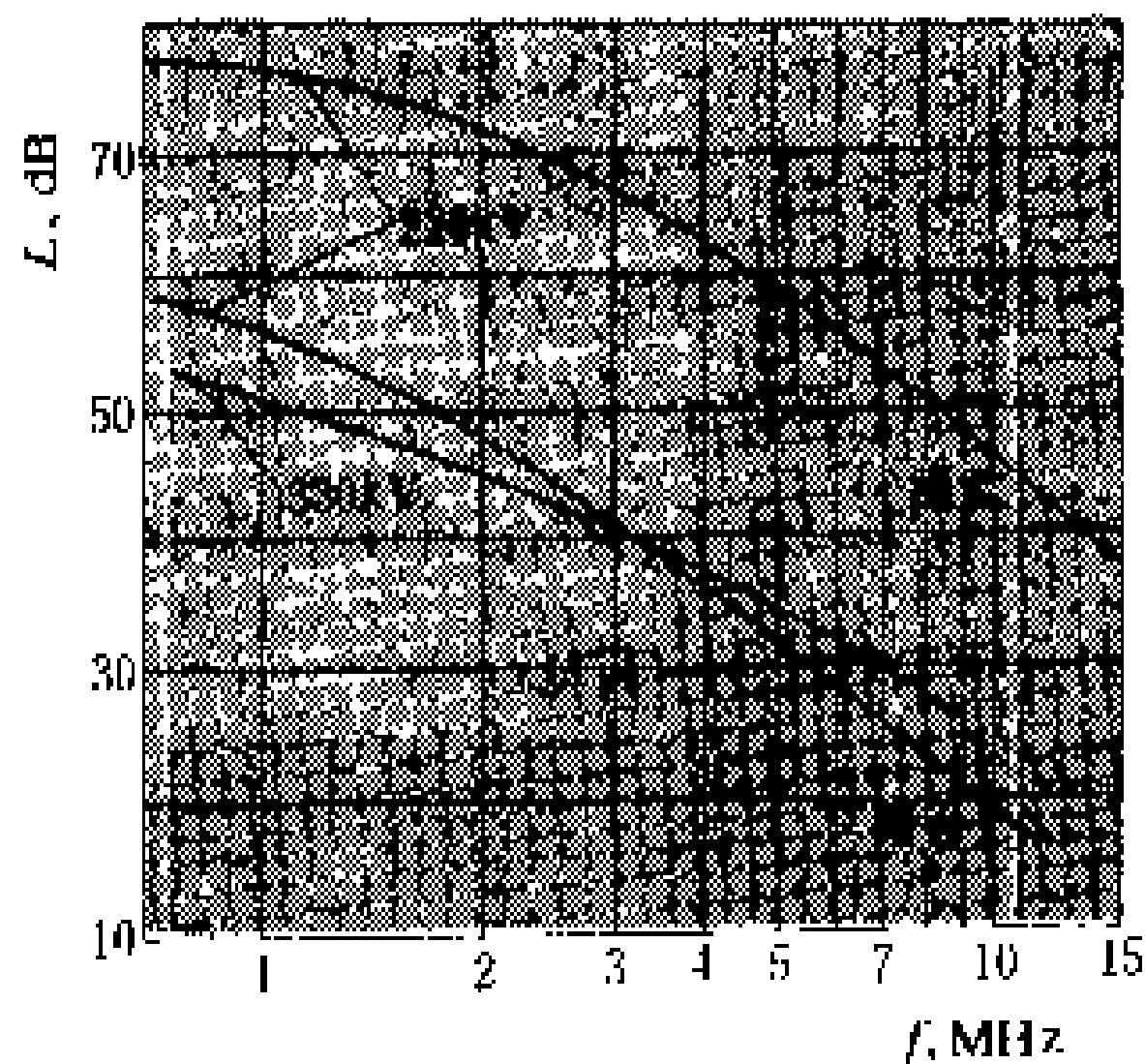


图 2 无线电干扰的频谱特性

干扰电平  $L(\text{dB})$  随离架空输电线路横向距离  $D$  (m) 增大而衰减的关系曲线称为横向衰减特性。330 kV 输电线路的横向衰减特性如图 3 所示。由横向衰减特性看出,  $D$  在 100 m 范围内,干扰电平衰减极快;不同频率的干扰电平,其衰减规律基本相同,但降至背景水平时所对应的横向距离则随干扰频率增高而减小。

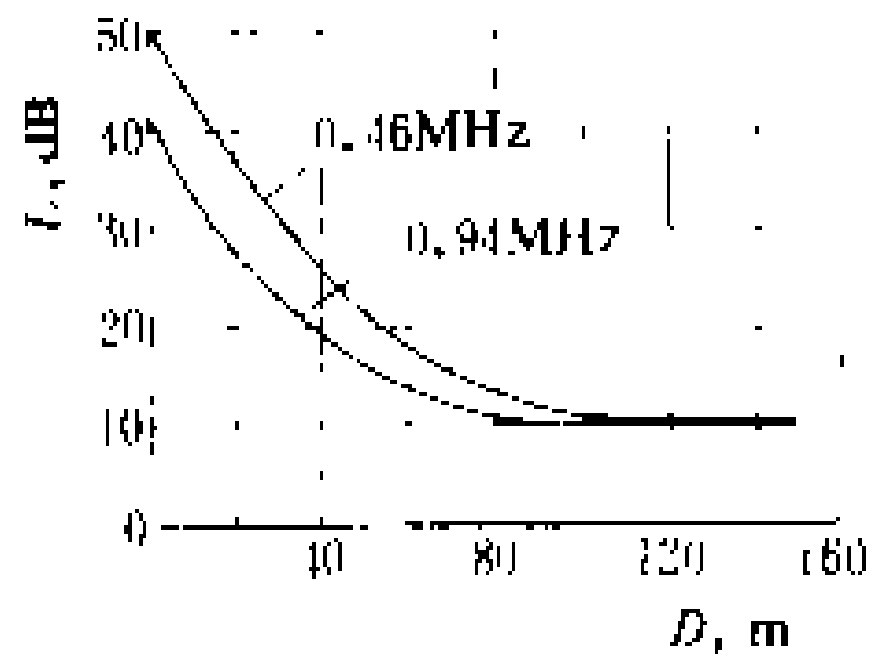


图 3 330 kV 输电线路无线电干扰的横向衰减特性

无线电干扰电平的强弱,主要由相导线的表面电场强度决定。苏联的原则是根据离架空输电线路横向 100 m 处的无线电干扰电平不超过允许值来确定相导线的允许最大表面电场强度  $E_r$  的,规定距 330~750 kV 水平排列分裂导线超高压线路边相导线投影点横向距离 100 m 处,干扰频率 1 MHz 的无线电干扰电平不超过 40 dB(以  $1\mu\text{V}/\text{m}$  为基准)。通过实测得出限制

无线电干扰的允许边相导线最大表面电场强度幅值  $E_r(\text{kV}/\text{cm})$  与相导线半径  $R(\text{cm})$  的关系(海拔高度不大于 500 m 时)为

$$\left. \begin{aligned} &\text{对于 } 330\sim 500\text{ kV 架空线路:} \\ &E_r = 31.1 - 17.4\lg R \\ &\text{对于 } 750\text{ kV 架空线路:} \\ &E_r = 32.2 - 17.4\lg R \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

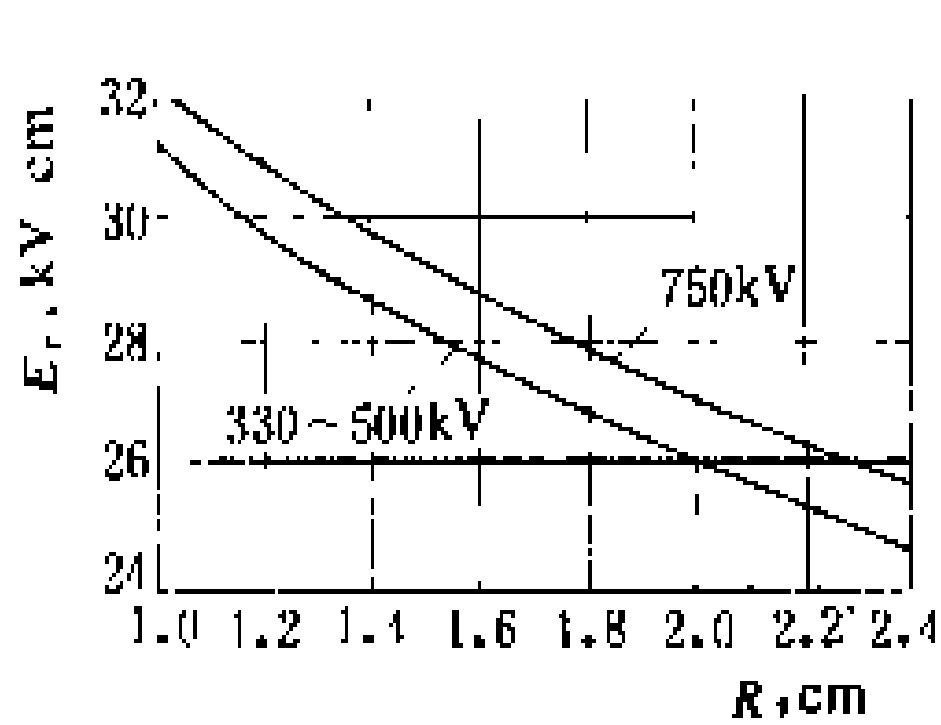


图 4 允许导线最大表面电场强度  $E_r$  与导线半径  $R$  的关系曲线

其相应的关系曲线如图 4 所示。

式(5)和图 4 说明限制无线电干扰的允许相导线最大表面电场强度  $E_r$  随着相导线半径  $R$  增大是减小的。而式(4)表明分裂导线线路的相导线表面电场强度最大值  $E_m$  随相导线半径  $R$  增大而显著减小。校验 330~750 kV 输电线路相分裂导线直径时,要求的判据是根据式(5)确定的限制无线电干扰电平的允许最大表面电场强度  $E_r$  须大于按式(4)确定的相导线最大表面电场强度  $E_m$ 。

中国根据大量实测得出距 110~500 kV 输电线路边相导线横向距离 20 m、高 0.5 m 处,晴朗天气时干扰频率 1 MHz 的无线电干扰电平  $L_{20}$  的经验公式为

$$\begin{aligned} L_{20} = &41 + 4(0.707 E_m - 15.3) + 40\lg \frac{d}{2.72} \\ &+ K\lg n \pm 2.85, \text{dB} \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $E_m$  为边相导线表面最大电场强度幅值,  $\text{kV}/\text{cm}$ ;  $d$  为导线直径,  $\text{cm}$ ;  $n$  为子导线根数;  $K$  为相导线的相关系数,取 5~10。校验时要求根据式(4)确定的  $E_m$  值代入式(6)算出的无线电干扰电平  $L_{20}$  小于规定的允许值。

中国对 500 kV 输电线路暂取距边相导线横向距离 20 m、0.5 m 高处晴朗天气时干扰频率 1 MHz 的无线电干扰电平不超过 50 dB。美国规定在征用地带边缘处晴朗天气时干扰频率 1 MHz 的允许最大无线电干扰电平为 37 dB,因这样的电平能保证无线电接收设备有良好的接收效果。德国规定距边相导线横向距离 20 m 处晴朗天气时干扰频率 1 MHz 的允许最大无线电干扰电平为 57.5 dB。

#### 按电晕噪声条件校验导线直径

750 kV 及以上电压的架空输电线路相导线在雨天产生电晕放电时,除产生无线电干扰外,还产生令人厌恶的电晕噪声。电晕噪声水平  $N=20\lg P/P_0$ ,dB (A)。其中  $P$  为测点的声压,  $\text{Pa}$ ;  $P_0$  为基准临界声压,

Pa。工程上取  $P_0 = 2 \times 10^{-5}$  Pa, 故  $N = 20 \lg P / (2 \times 10^{-5})$ , dB(A)。

电晕噪声的响度,很大程度上决定于相导线的表面电场强度,它随表面电场强度的增大而增大,当场强达到 25 kV/cm 后,噪声响度渐趋饱和。根据实测,噪声响度还随子导线半径和根数、导线表面状况和天气条件而变化。横向远离线路时,噪声响度会减小,然而减小的程度要比无线电干扰电平的减小慢得多。

国外根据实测结果,得出距 750 kV 及以上电压架空输电线路某相导线横向距离  $D$ (m) 处的噪声水平  $N$ [dB(A)] 与子导线半径  $R$ (cm)、根数  $n$  的经验关系式为

$$N = N_0 + 9R + 15 \lg n - 10 \lg D, \text{dB(A)} \quad (7)$$

式中  $N_0$  为雨天时相导线的起始噪声水平, dB(A)。根据实际测量,  $N_0$  与相导线的最大表面电场强度幅值  $E_0$  (kV/cm) 的关系曲线如图 5 所示。

三相导线对横向某处的总噪声水平为各相导线的噪声水平之和。不同国家采用的允许最大电晕噪声水平是不同的。苏联建议:对于 1150 kV 架空输电线路,在居民区,坏天气时防护带边缘处

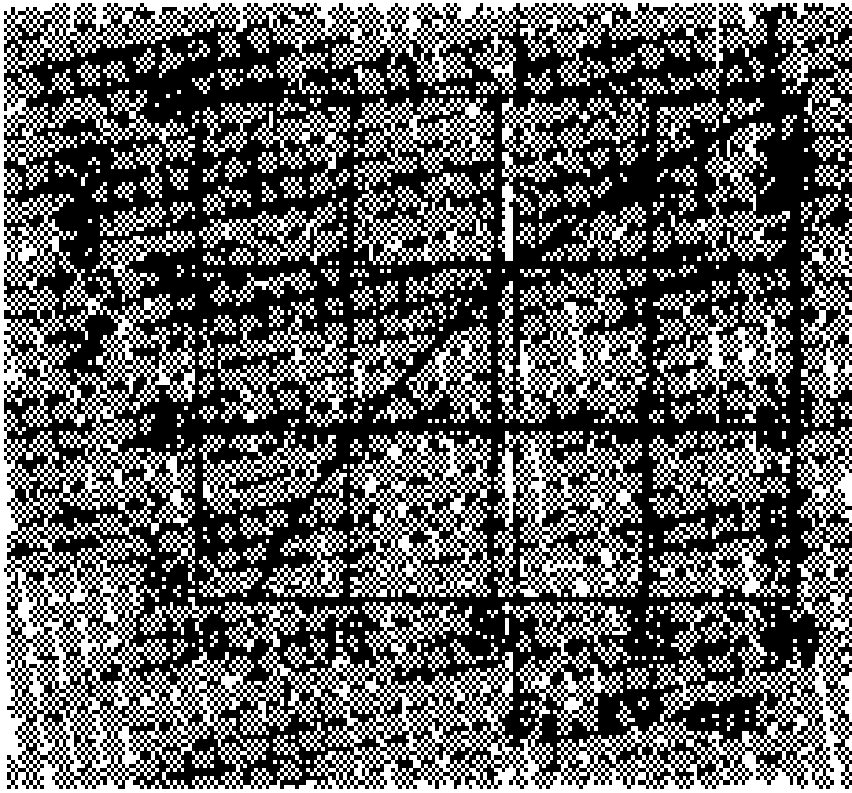


图 5 雨天时起始噪声水平  $N_0$  与导线最大表面场强  $E_0$  关系曲线

(距边相导线 300 m) 应不大于 70 dB(A); 对于 750 kV 架空输电线路,在居民区,雨天时防护带边缘处(距边相导线 300 m) 应不大于 65 dB(A),坏天气时应不大于 55 dB(A)。美国规定:雨天时,在征用地带边缘处应不大于 60 dB(A);坏天气时,在征用地带边缘处应不大于 52 dB(A)。

校验 750 kV 及以上电压架空输电线路相分裂导线直径时,要求的判据是根据式(7)及图 5 确定的在允许电晕噪声水平条件下的允许相导线最大表面电场强度  $E_0$  须大于按式(4)确定的相导线最大表面电场强度  $E_m$ , 即  $E_0 > E_m$ 。

参考书目

[苏]米里尼科夫等著, 330~500 千伏架空输电线路电气部分的设计, 湖北省高电压协作组等译, 电力工业出版社, 1977

[美]安德生等著, 345 千伏及以上超高压输电线路设计参考手册, 电力工业部武汉高压研究所译, 电力工业出版社, 1981

(Anderson J G. Transmission Line Reference Book 345 kV and above. Electric Power Research Institute, 1975)

(李博之)

shudian xianlu dianchang

输电线路电场 (electric field of transmission line)

输电线路运行时导线上的电荷在其周围广大空间产生的工频电场。除导线表面和地表面外,三相输电线路周围空间任一点的工频电场乃是一旋转场。这是由于该点对三相导线的距离不等,且三相导线上按正弦变化的电荷相互间有 120° 相角差,分别在该点产生的三个大小和方向不同、时间上又有 120° 相角差的电场分量合成的结果。该旋转场可用一旋转矢量来表示。矢量的大小和方向随时间的不同而改变,它在某一方向有一最大值,垂直于最大值方向有一最小值。该矢量的旋转轨迹为一椭圆,一般采用与最大电场强度  $E_{\max}$  及最小电场强度  $E_{\min}$  成比例的两个矢量来表示,如图 1 所示。它在某一方向上的投影,按时间展开则为正弦波,用电场强度表测量该方向的电场强度,即为该正弦波的有效值。

在输电线下离开地面 2 m 以内,旋转矢量最大值的方向偏离垂直地面不大,一般可看成垂直于地面,工程上常用电场强度的垂直分量和水平分量来表征空间某点的工频电场。由于线下离开地面 2 m 以内场强的水平分量很小,与场强的垂直分量合成后的场强很接近场强的垂直分量,故工程上一般就用场强的垂直分量来表示离地面 2 m 以内的电场。离地面 2 m 以上的空间电场,一般应同时给出场强的垂直分量和水平分量。

输电线路电场分布 输电线路导线在档距内的弧垂是按悬链线变化的,因此距档距中央不同水平距离的各个横向截面内的电场分布也不相同。表征整个档距内的工频电场分布,可用距档距中央不同水平距离的各个横向截面内的场强分布来表示,也可用整个档距内各不同场强值的等场强线来表示。由于档距中央导线弧垂最大,导线对地高度最小,线下场强最大,故工程上常用该处横向截面内的场强分布来表征输电线路的电场分布。

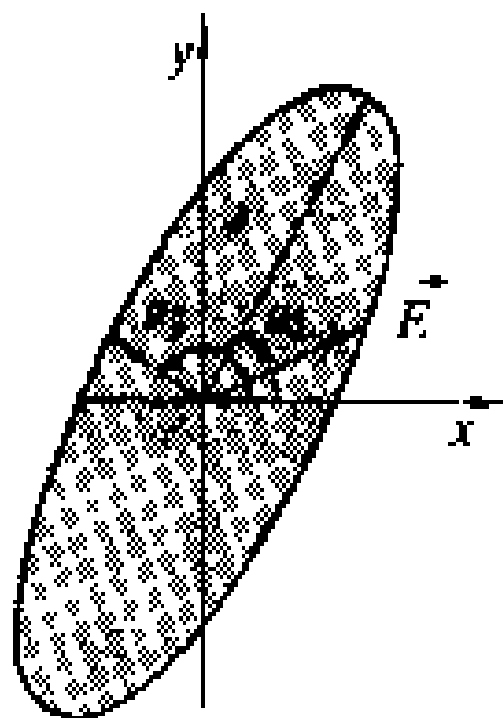


图 1 旋转矢量及其轨迹  
 $\vec{E}$ —旋转矢量;  $\alpha_1$ —最大场强与水平轴夹角;  
 $\alpha_2$ —最小场强与水平轴夹角

输电线下的电场除与导线对地高度有关外,还与导线的排列方式有关。图 2 所示为 500 kV 输电线路导线按水平、正三角和倒三角排列时线下离地面 1 m 高处横向截面内的场强分布情况。由图可见,在导线对地面高度相同的条件下,线下最大场强及高场强范围以导线倒三角排列最小,正三角排列次之,水平排

列最大。最大场强除倒三角排列时出现在中相导线下方外，其他排列一般出现在离边相导线线下外侧1~2 m处。

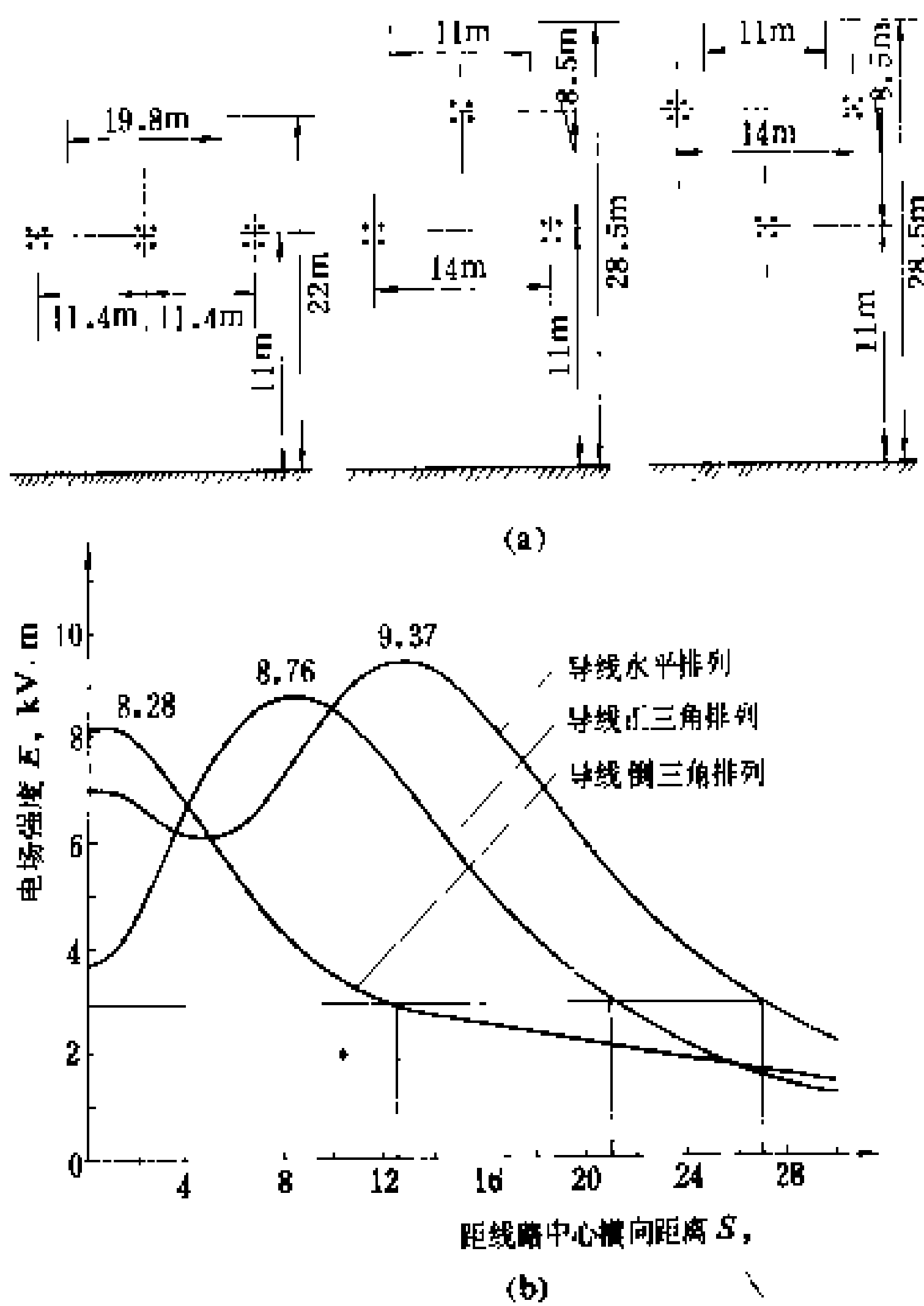


图2 500 kV 输电线路三种导线排列方式档距中央横向截面内的场强分布  
(a)导线排列方式;(b)场强分布曲线

输电线路电场计算 输电线下的工频电场分布可以准确计算,最常用的方法是等效电荷法。计算时,分裂导线用等效的单根导线代替,并假设电荷集中在该等效导线的中心位置,大地用一系列镜像电荷代替。根据线路电压和导线位置,先计算出单位长度导线的电荷量(用复数表示),再由此算出空间各点场强的垂直分量和水平分量。求合成场强时,除了考虑它们是相互垂直的两个矢量外,还应考虑它们之间的时间相角差,因此不能用两个矢量简单求和的办法来处理。计算时考虑架空地线和不考虑架空地线两种情况的线下场强仅相差1%~2%,为简化计算,某些情况下可以不考虑架空地线的存在。

输电线路电场测量 输电线路导线下的工频电场,可用悬浮体型场强表和地面场强表来测量。离地面2 m以内的电场可只测场强的垂直分量。测量时作业人员须离被测点2 m以外,避免作业人员使被测点的电场产生畸变;同时空气的相对湿度不宜大于80%,避免由于支持场强表的绝缘杆表面泄漏带来的测量误差。

影响输电线路电场强度的因素 导线对地距离、

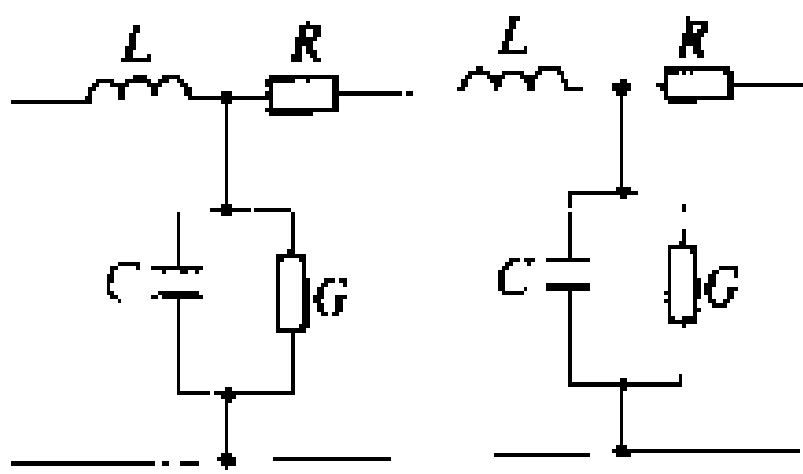
相间距离和导线排列方式对输电线路的场强数值大小均有明显影响。增大导线对地高度,在初始时场强显著减小,高度超过20 m后则减小的幅度很小。缩小相间导线水平距离对减小地面附近场强也有一些效果。导线呈三角形排列比水平排列对减小地面附近场强较为有利。至于双回路鼓形排列的线路,采用相同相序布置时地面附近场强大,互逆相序布置时场强减小。但在输电线路工程建设中则要综合考虑诸多技术和经济的条件,选择合理可行的设计方案。

(邵方殷)

shudian xianlu dianqi canshu

输电线路电气参数 (electrical parameters of transmission line)

表征输电系统的电气特性并作为计算输电线路传输能力和输电效率所用的数据。输电线路本身最基本的电气参数是线路电阻、线路电感、线路电容和线路绝缘的泄漏电导,分别用 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 、 $G$ 表示。这四项基本电气参数的分布情况如图所示。输电线路的基本电气参数与线路电压、电流以及功率因数等的大小并无直接关系,而是决定线路的输电容量和输电效率的重要因素。



输电线路电气参数分布图

输电线路的基本电气参数对输电线路的设计和运行至关重要。在研究确定输电线路的安全载流量、电压降、线路电能损耗、系统无功补偿以及系统的稳定度等技术经济指标时,无不涉及线路的基本电气参数。例如:线路的安全载流量是由导线最高允许温度所决定的,导线的温升是由电阻引起的,电阻损耗是线路电能损耗的最主要部分,此外还有电晕损耗和经由绝缘子的漏泄损耗。线路电压降以及系统中的电压调整方案,取决于线路电阻、电感、电容的数值以及频率和电流的大小。长输电线路的充电电流与输电线路长度成正比,故输电线路电容更不能忽视,它对输电线路的暂态过程有很大的影响。系统的稳定度(即在稳定状态下系统中某点所能通过的最大功率)与输电线路的电感、电容、电阻也有密切关系,调配好输电线路的基本电气参数,就能提高系统的稳定度。至于系统中的无功补偿,如电抗器、电容器和同步调相机等装置的选择,更是根据输电线路电感、电容的分布情况考虑的。

输电线路的电阻 输电线路的功率损耗包括三个方面,即导线电阻引起的发热损耗、电晕损耗以及经由绝缘子的泄漏电流所引起的损耗。其中以导线电阻发

热损耗占主要部分,其数值比其余两种损耗要大得多。通常所说的输电线路导线电阻均指对应于三方面功率损耗的实效电阻而言,可表示为

$$R = \frac{P_L}{I^2} \quad (1)$$

式中  $R$  为导线的实效电阻,  $\Omega$ ;  $P_L$  为导线上的功率损耗,  $W$ ;  $I$  为导线上的电流有效值,  $A$ 。

当导线上的电流均匀分布时,导线的实效电阻值等于其直流电阻值。在一根长而均质的导线上通以直流电流,则导线上任何一个截面内的电流密度皆相同。导线的直流电阻可表示为

$$R_0 = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

式中  $R_0$  为导线的直流电阻,  $\Omega$ ;  $\rho$  为导线的电阻率,  $\Omega \cdot mm^2/m$ ;  $l$  为导线的长度,  $m$ ;  $S$  为导线的截面积,  $mm^2$ 。

多股绞线的电阻比同长度单线的电阻增大约 2%~3%。因为在多股绞线中,除中心一股外,其余各股扭转的长度比已绞好后的导线要长。

导线电阻随环境温度的变化而变化。以 20℃ 时的电阻为基准,则温度为  $t$  时的电阻为

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha_{20}(t - 20)] \quad (3)$$

式中  $R_t$  为温度  $t$ ℃ 时的导线电阻,  $\Omega$ ;  $R_{20}$  为温度 20℃ 时的导线电阻,  $\Omega$ ;  $\alpha_{20}$  为 20℃ 时的电阻温度系数。

导线上通以交流电流时,则截面内的电流密度是不均匀的,愈靠近导线表面,电流密度愈大;接近导线中心,电流密度减小。这种现象称为集肤效应。造成集肤效应的原因是由于导线内部交流磁场的作用,使导线内层和外层的反电动势不同。

交流电阻  $R$  与直流电阻  $R_0$  可按下式换算

$$R = R_0 F(mr) \quad (4)$$

式中  $F(mr)$  表示  $m$  与  $r$  乘积的函数;  $mr = 2\pi r \times \sqrt{2f\mu/\rho}$ ;  $f$  为交流频率,  $Hz$ ;  $r$  为导线的半径,  $mm$ ;  $\mu$  为导线的磁导率,  $H/m$ ;  $\rho$  为导线的电阻率,  $\Omega \cdot mm^2/m$ 。由式(4)可以看出,导线愈粗,频率愈高,集肤效应愈明显。通常,对于小截面的导线可不考虑集肤效应。

交流电流通过几根靠得很近的导线时,由于磁场的作用,还会产生邻近效应,电流在导线截面内不再是均匀分布的,相邻导线的内侧电流密度较大,离得较远的导线外侧电流密度较小。

当采用分裂导线时,每相导线的等效电阻  $R'$  可按下式计算

$$R' = \frac{R}{n} \quad (5)$$

式中  $n$  为一相中的子导线根数;  $R$  为每根子导线的电阻,  $\Omega$ 。

在相分裂导线中,因为相电流产生的磁通互相交链,在各子导线间产生环流,使各导线中的电流略有不平衡。但对等效电阻值影响甚小,可忽略不计。

此外,钢芯铝绞线在通过交流电流时,存在钢芯的磁滞损耗和涡流损耗,也会引起电阻值的增大。

**输电线路的电感** 当交流电流通过导线时,在其周围产生交变电磁场。导线中的电流变化时,电路中的磁链也随之变化而产生感应电动势。感应电动势值与磁链的变化率成正比。如果磁链所在介质的磁导率不变,则磁链数与电流成正比,从而感应电动势与电流的变化率成正比。电感的概念可以理解为:电路中感应电动势对其单位时间内电流变化的比值,或者简化为电路中磁链对电流的比值。这种由电路本身电流变化而引起感应电动势的现象称为自感。自感的数值等于单位时间内电流强度变化一个单位时,引起的感应电动势的量值。一个电路中电流发生变化而产生的磁通,还会与邻近另一电路的磁通相链,形成磁耦合回路,并在另一电路中引起感应电动势,这种现象称为互感。互感的数值等于单位时间内,一个电路中电流强度变化一个单位时,由于互感而在另一电路中引起的感应电动势的量值。输电线路的电感为自感和互感的总和。电感的单位为亨利(H),相当于电流强度变化为每秒 1 安培引起 1 伏特感应电动势时的电感。输电线路电感的数值视导线的材质、规格以及导线排列位置等因素而定。

**输电线路的电容** 交流电流通过导线时,导线上有电荷存在。两根导线相当于电容器的两个极板,导线之间的空气为介质。当输电线路加上交流电压时,线路即开始充电,电荷随导线上的电压变化也作交流正弦波变化。由于交变电压在导线间产生充电和放电,输电线路就有充电电流流动,形成一个分路电源,即使输电线路开断后仍然存在。电容的概念可以理解为电容器的电荷对其极间电压的比值。平行两导线间的电容是一个常数,其数值由导线的半径大小和线间距离决定。每一根导线与中性点之间也存在电容,在平衡状态下,每根导线至中性点的电位差为两根导线间电位差的一半,而中性点的电位为大地电位,所以导线与中性点之间的电容也就是与大地之间的电容(简称对地电容),其大小等于两导线间电容的二倍。

对于三相交流输电线路,各相导线间以及各相导线对大地之间都有电容存在。多回路同塔架设的输电线路,各回路各相导线以及各导线对大地之间也存在电容。大地对输电线路的电容影响甚大,因为大地改变了输电线路的电场分布,尤其是对长距离的超高压输电线路,导线对大地的电容,产生很大的充电功率。



输电线路电容值,受导线半径、导线的排列方式(即线间距离)以及导线对地距离等因素的影响。导线对称排列和不对称排列的线路,电容数值也有明显差别。架空地线在线路正常运行时,对线路电容的影响很小,因为线路电压平衡。在电力系统发生故障时,架空地线上通过零序电流,则架空地线对零序电容的影响很大,不能忽视。电容的单位是法拉(F),相当于极板上的电荷等于±1库仑、极板间电压等于1伏特时的电容值。

**输电线路的泄漏电导** 由输电线路绝缘子的泄漏损耗以及输电线路电晕损耗换算成的泄漏电导数值。泄漏电导的大小与输电线路电压的平方、系统频率以及空气温度等因素有关。绝缘子的损耗包括绝缘子表面的泄漏电流损耗和绝缘子内部的介质损耗。电晕损耗是由于导线周围空气介质在高电场强度下游离放电所引起的损耗(见输电线路电晕)。输电线路正常运行情况下,泄漏电导与其他三项基本电气参数(即输电线路电阻、电感、电容)相比,其影响是很小的。

**输电线路的阻抗和导纳** 在具有电阻 $R$ 、电感 $L$ 和电容 $C$ 的交流线路上,线路两端电压的有效值与线路中电流的有效值的比值,定义为线路阻抗 $Z$ ,通常用复数表示为 $Z = R + j\omega L = R + jX$ 。阻抗的实数部分为线路的电阻 $R$ ,虚数部分为线路的电抗 $X$ 。阻抗的倒数为导纳 $Y$ ,通常用复数表示为 $Y = G + j\omega C = G + jB$ 。导纳的实数部分为线路的泄漏电导 $G$ ,虚数部分为线路的容性电纳 $B$ 。

**输电线路的序阻抗** 三相平衡电路的各相电流之相量和为零。在不平衡的三相系统中,电压和电流均可分解为正序、负序和零序三种分量。正序电流与负序电流均三相对称,正、负序电流的相量和为零。不同序电流在系统内将通过不同的阻抗,此阻抗称为序阻抗。在通过导线换位达到对称的线路中,正序和负序的阻抗相同。零序阻抗则视三相的连接方式,可能与正序和负序阻抗不同。由于零序电流通过大地和架空地线,所以零序阻抗包含架空地线和大地的阻抗,其数值也随着架空地线的根数和各处的地质不同而有所差异。

(黄志明)

shudian xianlu dianqi sheji

**输电线路电气设计** (electrical design of transmission line) 根据电力系统发展规划和输电任务的要求,对输电线路有关电气部分的专门问题进行计算和论证,提出技术先进、安全可靠、经济合理的设计方案和施工安装详图的全过程。电气设计是输电线路设计的重要组成部分,其余如机械部分设计、

杆塔设计和杆塔基础设计等都是围绕着电气设计所确定的技术条件进行的。输电线路电气设计主要包括确定输电规模和导线选择、线路本体电气设计、环境影响对策三方面内容。

(1)确定输电线路的输电规模和导线选择。根据输电工程建设项目可行性研究报告的结论,确定线路的输电容量、输送距离和电压等级。通过系统稳定度、线路电阻损耗、电晕损耗等方面的计算和经济比较,结合远景发展规划的要求,选择导线的规格、材质和型号,包括分裂导线的根数和结构方案。导线选择是输电线路电气设计的重要工作。

(2)输电线路本体电气设计。在导线选择定案之后进行的几项工作:①研究导线排列方式和线间距离,并从电气性能的要求提出杆塔的选型方案。②绝缘设计。选择绝缘子型号和每串片数,确定空气间隙,进行塔头绝缘配合以及布置方案设计,并提出耐张杆塔的跳线设计。③防雷设计。进行耐雷水平和耐雷指标的计算,确定架空地线的规格、根数及其对导线的保护角,验算导线和架空地线在档距中央的防雷距离,提出接地装置设计方案。④从电气性能的要求提出金具选型和组装方案。⑤研究确定线路换位循环的次数、布置地点以及换位的方式。

(3)环境影响对策。输电线路对周围环境的影响,属于电气方面的有:①对线下及附近人、畜、车辆、农业机械以及建筑物等的安全距离。对于超高压输电线路,还应考虑静电感应的影响。②线路导线、金具电晕放电所产生的高频电磁场对无线电广播、通信、雷达以及地震测量台站等设施造成的干扰影响。对特高压输电线路还应考虑噪声影响。③输电线路的电磁场对与其接近的有线电信线路的干扰及危害电信设备和人员安全的危险影响。为防止和减小输电线路对环境的影响,在线路设计时,应通过调查研究,按照有关规定,进行计算和试验,提出设计方案和相应的防护措施。(见输配电电磁与环境影响、输电线路危险影响、输电线路干扰影响、输电线路无线电干扰、输电线路可听噪声)

(黄志明)

shudian xianlu dianyun

**输电线路电晕** (corona effect on transmission line) 在高电压的作用下输电线路导线表面电场强度升高,致使导线周围的空气发生游离放电并显现紫蓝色的辉光和发出轻微的嘶嘶声的现象。电晕放电造成输电线路电能损耗,引起对无线电及载波通信的干扰,甚至引起环境噪声影响。电晕放电所产生的臭氧和氧化氮与周围介质发生化学反应还会加速线

路绝缘老化或金属导线和金具的腐蚀现象。对于超高压线路,为了减少电晕损耗和对无线电通信的干扰,保证线路安全经济运行,需要采取措施。输电电压再提高,电晕造成的电能损耗和对环境影响的问题更加突出,在特高压输电线路的设计和运行中,电晕成为关键的技术问题。

**电晕放电的形成** 当输电线路电压升高,导线表面的电场强度达到一定数值时,将引起紧靠导线周围的空气分子碰撞游离,空间电荷数量增加,造成导线附近小范围内的预放电条件。导线表面粗糙凹凸不平或沾有污秽物的地方,由于局部电场强度特别高,是局部预放电的起源处。这种局部预放电功率很小,也是不稳定的,属于电晕放电的前期。电压继续升高,各局部放电电流逐渐汇集起来,但其数值仍然很小。直到电压升到某一数值,导致电晕放电电流突然增加,开始在导线上看到电晕辉光,接着可以听到电晕放电声。开始产生可见电晕现象的电压,称为电晕起始电压。起始电晕还是局限于导线表面不光洁的地方。随着导线电压的再升高,放电现象才逐渐扩展到导线的全部表面,称为全面电晕。

**临界电场强度** 开始出现全面电晕时的导线表面的电场强度。由于导线直径和表面状态的差异,外界气候条件变化以及与海拔高度相关的空气密度不同等客观因素的影响,在实际线路上,临界电场强度是各不相同的。各国学者提出过许多计算临界电场强度的公式,其结构相似,只是在采用的系数上有一些区别。最著名的是皮克(F. W. Peek)公式,它是在实验室的条件下,对两根经过特殊加工的光滑等径圆形平行导线进行大量测试的基础上,经过综合分析建立起来的,皮克公式为

$$E_0 = 30.3m\delta \left( 1 + \frac{0.298}{\sqrt{r_0\delta}} \right) \quad (1)$$

式中  $E_0$  为临界电场强度, kV/cm(最大值);  $m$  为考虑实际线路上导线表面状态与实验室中光滑导线的差别的修正系数,一般绞线可取 0.82~0.85;  $r_0$  为导线半径, cm;  $\delta$  为空气相对密度。

导线表面电场强度超过临界电场强度后,如果电压仍继续升高,则电晕放电现象更为严重,这在一般运行情况下是不允许的,应采取措施加以限制。

**电晕损耗** 由于线路导线周围空气中的电荷在电场中移动和发光而引起的功率消耗。对于 110 kV 及以下电压的线路,导线截面一般受经济电流密度或发热条件控制,所选出来的导线总是能够避免电晕的产生。电压在 154~220 kV 及以上的线路,或者是通过高海拔空气稀薄地区的线路,研究电晕放电及其引起的电能损耗和对无线电及载波通信的干扰就具有实际意

义。

关于输电线路电晕损耗值的计算,皮克也曾经用各种不同直径和结构的导线,在各种不同的空气密度、不同频率以及导线表面清洁干燥的状况下进行广泛的实验,提出实验公式

$$P = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{S}} (U - U_0)^2 \times 10^{-5} \quad (2)$$

式中  $P$  为每相电晕损耗, kW/km;  $f$  为电力系统的频率, Hz;  $\delta$  为空气相对密度;  $r_0$  为导线半径, cm;  $S$  是相间距离, cm;  $U$  为线路相电压, kV;  $U_0$  为临界电晕电压, kV。公式(2)纯粹是实验公式,不以任何理论作依据。实际上输电线路电晕损耗的大小不但与线路电压、导线规格、导线表面状态、导线排列方式和杆塔尺寸有关系,而且线路通过地区的气候因素对电晕损耗影响极大。好天气和最不利的气候条件下的电晕损耗相差可达数倍至数十倍之多。雨、雪、霜、雾、露等不同气候条件中,雨对电晕损耗的影响最大。在导线上覆有雾凇的情况下,常常测到很大的电晕损耗值。由于涉及复杂而又多变的诸多因素,准确计算输电线路的电晕损耗是不可能的。许多国家在建设超高压和特高压输电线路时,一般都是先在试验线段上进行大量有系统的电晕损耗测量,以取得在不同导线、不同线路参数和不同气候条件下每千米线路的电晕损耗值,然后结合拟建线路沿线各段一年中各种天气(一般分为晴天、雪天、雨天和雾凇天四类)出现的分布概率,按公式(3)进行年平均电晕损耗的估算,即

$$P_1 = \frac{n^2 r_0^2}{8760} \sum P_i T_i \quad (3)$$

式中  $P_1$  为每相电晕年平均损耗, kW/km;  $n$  为每相分裂导线的根数;  $r_0$  为导线半径, cm;  $P_i$  为晴天、雪天、雨天、雾凇天四种天气条件下的电晕损耗值(来自试验线段的测量统计), kW/km;  $T_i$  为上述四种天气在一年中的持续时间, h。

**电晕干扰** 输电线路电晕放电过程中,产生连续重复性的电流和电压脉冲,这些脉冲产生的电磁振荡,导致在电晕导线上出现经常性的电磁辐射,成为干扰源。输电线路电晕干扰可分为两种:一种是从线路辐射的无线电干扰,对收音机和无线电发射台站的天线产生干扰;另一种是沿输电线路传播的干扰信号,影响电力线上高频载波通道的正常工作。输电线路电晕引起的无线电干扰,其频率正好位于调幅广播频带范围以内,所以对广播中调幅波段的收听干扰最为明显。在电晕干扰下,评价收听广播的质量一般用信噪比表示,它是以分贝(dB)表示的信号电平与干扰电平的差值。收听到的无线电广播信号比综合干扰信号平均高出 20 dB,如换算到电压,则广播信号电

压比干扰信号电压大约高 14 倍,则可认为收听效果满意。收听到的电力线高频载波通道信号电平至少须比干扰电平高出 26 dB。至于对电视广播的干扰主要是由于不良绝缘子和导线或金具上的毛刺放电以及输电线路对电视波的反射所引起的,消除这些缺陷,电视干扰即可避免。

与电晕损耗类似,电晕对无线电干扰的强弱也与导线表面状态以及气候条件关系密切。此外,电晕对无线电的干扰电平随着与线路距离的增大,横向衰减很迅速。一般认为距离线路 100 m 外,无线电干扰电平已降低到很弱程度;距离达到 200 m,就可能衰减到背景干扰电平以下。

**电晕噪声** 除电晕干扰外,电晕放电还伴随产生使人烦恼的可听噪声。与人们生活环境中日常发生的其他噪声相比,对于 500 kV 及以下电压的高压和超高压输电线路,电晕引起的噪声通常是很小的,不必采取特殊措施予以限制。随着线路电压提高,如 750 kV 及以上的超高压及特高压输电线路,电晕噪声问题逐渐突出并引起人们注意,甚至在一些国家电晕噪声成为建设特高压输电线路的限制因素。输电线路的可听噪声主要发生在坏天气情况下,由于水滴碰撞或聚集在导线上而促使大量电晕放电,每次放电都发生炸裂声。线路电晕可听噪声有两个特征分量:①宽频带无规则杂乱无章的劈劈啪啪的噓嘶声噪声;②频率为 100 Hz 或 120 Hz 及整倍数的纯音分量交流嗡嗡噪声。可听噪声的强弱决定于导线电晕的强弱,因而与每相分裂导线的根数和直径的大小以及其表面状态有关,也随天气变化而有明显差异。雨天在交流线路上,当电场强度为 20 kV/cm 时,噪声水平比好天气时增大 25 dB(A)。在更高的电场强度下,天气好坏的影响程度则减小。可听噪声也随着与线路横向距离的增大而衰减,但其衰减的速度比对无线电干扰的衰减要慢得多。

**降低电晕影响的措施** 输电线路电晕放电造成电能损耗、对无线电干扰和引起噪声等多方面不利的影响,随着输电电压不断提高,越来越成为电力系统发展的突出问题。220 kV 线路和更低电压的高压输电线路,在一般平原地区,导线表面电场强度不高,电晕损耗和对无线电干扰一般不需要特别考虑。线路通过高海拔地区,由于空气稀薄,临界电晕电压下降,则需要按电晕条件,验算导线的规格是否选择合适,必要时加大导线的规格。330~500 kV 超高压输电线路,为减少电晕损耗、降低对无线电的干扰电平,一般都采用相分裂导线,对绝缘子串和金具采取均压和屏蔽等防止电晕措施。在新线路设计时,导线表面电场强度与临界电场强度之比如不超过 0.9,则好天气条件下,线路上观

察不到全面电晕。国外超高压输电线路所采用的这个比值一般都取 0.7~0.8 之间,所以电晕损耗都能够控制在较小的数值。500 kV 输电线路每千米年平均电晕损耗不过几个千瓦,只占线路电阻损耗的百分之几,无线电干扰电平在好天气时也是很低的。在现有线路升压改造等特殊情况下,为了利用原有的线路,电晕损耗条件可适当放宽,电场强度允许采用较高的数值。

电晕放电与导线表面状态关系较大,新建线路运行初期电晕放电比较明显,经过一段时间运行后,导线表面的毛刺、伤痕以及制造过程中沾上的油脂、架线时附着的杂物等逐渐消除,表面光滑程度改善,电晕损耗和无线电干扰电平也相应降低。为了保护导线在架设时不受外伤,少沾外来杂物,超高压输电线路普遍采用张力架线的施工工艺,导线展放和牵引过程均在空中进行,不与地面接触。绝缘子和金具则在造型及制造工艺上采取特殊措施,并通过严格试验,选择防电晕性能良好的产品。对于各种无线电通信设施的干扰,除在线路设计时考虑必要的措施外,还应按照有关规定,使线路与这些设施之间保持一定距离,以保证无线电设施正常工作。为克服电晕对电力线载波高频通信的干扰,一般采用加大载波通信设备的功率等措施,也收到良好的效果。

参考书目

[美]安德生等著.345 千伏及以上超高压输电线路设计参考手册,电力工业部武汉高压研究所译,北京:电力工业出版社,1981  
(Anderson J G. Transmission Line Reference Book 345kV and above. Electric Power Research Institute, 1975)

(黄志明)

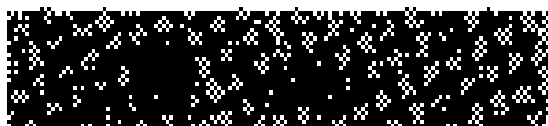
shudian xianlu dingwei

**输电线路定位** (structure spotting for transmission line) 根据已经选好并审定通过的线路路径进行定线和断面测绘,并合理地配置杆塔的位置。定位的目的是使全线杆塔的数量较经济、选择的杆塔位置较合适、选定的杆塔型式较恰当,从而使线路造价降低,并保证施工方便,运行维护安全可靠。

输电线路定位的具体内容包括塔位选择、档距配置、选用杆塔三个方面。

(1)塔位选择。具体要求为:①塔位要选择在地基稳固处,尽可能避开洼地、水库、冲沟、陡坡、河边等水文、地质不良处所,对拉线杆塔还应考虑拉线基础的条件;②耐张型杆塔宜设在较平缓的便于紧线施工的地方;③能有较好的杆塔组立施工场地;④与交叉跨越物之间应按规定保持一定距离。





(2)档距配置。具体要求为:①最大限度地利用杆塔的强度和高度;②相邻档距的大小尽可能避免十分悬殊,以减小纵向不平衡力;③当与导线排列方式不同的杆塔相邻时,应注意档距中央导线的接近情况,必要时可缩短档距;④尽可能避免出现孤立档。

(3)选用杆塔。具体要求为:①尽可能多用最经济的杆塔型式与杆塔高度;②全线杆塔型式种类要少,并尽量避免使用特殊设计的杆塔;③对耐张型转角杆塔要尽量降低杆塔高度。

输电线路定位工作一般分室内图上定位与室外现场定位二步进行。

**室内图上定位** 根据线路平断面图,使用以透明赛璐珞片制成的弧垂模板,按照导线弧垂对地或对交叉跨越物的距离要求,试排塔位,反复进行方案比较及各项校验,最后和平断面图上画出一个比较经济合理的方案。

国外目前对输电线路室内定位已利用航测技术制出平面、断面图,并用计算机进行定位。因计算机可以作更多方案的反复试排,故可以求得塔位及塔型的最佳方案。中国也有几家电力设计院在研究试用这一新的工作方法。

**室外现场定位** 室内图上定位结束后,按图上确定的塔位和塔型,在现场验证落实。具体工作内容包括校测和补测塔位标高、相邻塔间的距离、危险点和控制点断面,查看塔位条件是否合适,必要时尚需补测塔基平断面,以便设计时考虑高低塔腿或高低基础,同时进行塔基地质、水文勘察,为杆塔基础设计提供原始资料。当线路有交叉跨越时,对现场复测后修正的断面图,尚需校核导线弧垂对交叉跨越物的安全距离。若图上安全裕度不大,则需应用精确的计算方法,按实测资料计算出准确的安全距离。如不能满足规定的安全距离要求,则尚需移动塔位或增加塔高。

现场定位时,通常还需进行下列校核及检验工作:

(1)杆塔使用条件校核。检查水平档距、垂直档距及线间距离是否在原设计条件内,如不满足则变换杆塔型式。

(2)直线型杆塔绝缘子串摇摆角校核。按水平档距及垂直档距检查绝缘子串摇摆后导体对横担、塔身及拉线的安全距离,若不满足要求,可通过加重锤、移动杆塔位置或更换杆塔型式解决。

(3)导线及架空地线上拔检查。按水平档距及垂直档距检验导线及架空地线是否上拔,若上拔程度轻微,对直线型杆塔绝缘子串可加重锤,加重锤仍不能解决时,则改用耐张型杆塔。对耐张型杆塔要校验上拔力对横担的影响。

(4)悬垂绝缘子串机械强度检验。按水平档距、垂

直档距及代表档距检验悬垂绝缘子串的机械强度,若强度不够则增加绝缘子串数。

(5)耐张绝缘子串倒挂必要性检查。按杆塔间实际档距及导线悬挂点高差检验耐张绝缘子串是否需倒挂。

(6)悬垂线夹允许悬垂角校核。在最高气温或最大覆冰条件下,按代表档距、水平档距及垂直档距校验悬垂线夹的悬垂角,如悬垂角超过允许范围,则应改为双悬垂线夹或将杆塔改为耐张型杆塔。

(7)架空线悬挂点应力校核。在最严重气象条件下,按代表档距、水平档距及垂直档距校核架空线悬挂点应力,若不满足要求,则应放松架空线或改变架空线型号。

(8)边线风偏时对房屋及对地距离校核。按最大风速校核水平距离及垂直距离,如不满足安全要求,则应移动塔位、增大塔高或适当削除土石方。

(9)交叉跨越间距校核。按实测资料计算跨越间距,如不满足规定要求,则应增加塔高或移动塔位。

(10)使用模板是否合适的检查。按实际代表档距校正。

(11)导线上挂有作业飞车时底部对被交叉跨越物的安全距离校验。按最高温度时挂飞车后弧垂增加值加上飞车高度校验对交叉跨越物的安全距离,如不能满足要求,则应增加塔高或移动塔位。

(12)超高压线路导线风偏时对住人房屋处的地面场强校验。一般取允许场强为 $3.5\sim 4\text{kV/m}$ ,如超过则需增加塔高。

(唐在德)

shudian xianlu fanglei sheji

**输电线路防雷设计** (lightning protection design of transmission line) 见线路防雷。

shudian xianlu ganrao yingxiang

**输电线路干扰影响** (interference effects of transmission lines) 输电线路与电信线路接近时,通过感性、容性和阻性耦合,在电信线路上产生的

电流和电压,足以破坏电信设备的正常运行,降低电信线路传输质量,使模拟信号系统产生杂音,使数字信号系统产生差错,均称干扰影响。而干扰影响中主要是指对模拟信号系统的音频电话和数字信号系统的普通电报的影响。音频电话的话音频率范围为 $300\sim 3400\text{Hz}$ ,除输电线路基波电流和电压的影响外,主要是各次谐波电流和电压的影响,因为这些谐波电流和电压的频率正好在话频范围内,使电话回路受到干扰而产生杂音。普通电报的频率为几十赫兹,主要是输电线路基波

电流和电压的影响。衡量干扰影响的电气量为：①对电话回路为输电线路各谐波电流和电压在该回路上产生的等效于 800Hz 时的杂音电动势；②对电报回路为输电线路的基波电流和电压在该回路上产生的流经电报机的干扰电流。由感性、容性和阻性三种耦合方式产生的干扰影响，根据不同情况，可单独存在，也可二者或三者兼有。（见输电线路感性耦合影响、输电线路容性耦合影响、输电线路阻性耦合影响）

产生干扰影响的线路状态 ①输电线路状态：中性点直接接地系统的三相对称输电线路在正常运行时；中性点不直接接地系统的三相对称输电线路在正常运行和发生故障时；不对称输电线路在正常运行时。②电信线路状态：架空明线和电缆电信线路在开通音频电话和普通电报时。

干扰影响容许值 电话在电信线路上传输时，将会受到两类干扰源的影响而产生杂音：①由电信线路和电信设备内部产生的干扰源引起的杂音，如电信设备的热杂音和非线性杂音、电子元件固有杂音、送话器杂音、串话、接触不良引起的杂音、单线电话接地引起的杂音等；②由外部干扰源进入电话回路引起的杂音，如邻近的输电线路、电气化铁道接触网、铁路自动闭塞装置的高压线、广播线等的干扰引起的杂音。由于电话回路存在各种杂音，使语言清晰度有明显的降低。

对电话回路传输质量的评价是根据语言清晰度试验判定的，即采用正确的接收信号（声音、音节、字或词句）数与传送总信号数的百分比的清晰度系数（也称可懂度系数）来说明电话传输质量的，如清晰度系数在 85% 及以上时，认为语言传输质量是良好的，清晰度系数为 75% 时认为合格，清晰度系数低于 70% 时认为不合格。电话回路杂音电动势的容许值是根据回路在内外各种干扰源引起的杂音下，满足语言传输有良好的清晰度的要求来确定的。电报回路干扰电流的容许值是根据不使电报工作有明显差错的要求来确定的，这样的干扰电流应比电报机的工作电流小得多。目前中国使用的电报机种类繁多，各种电报机的工作电流也不同，故电报机干扰电流容许值也各有差异。

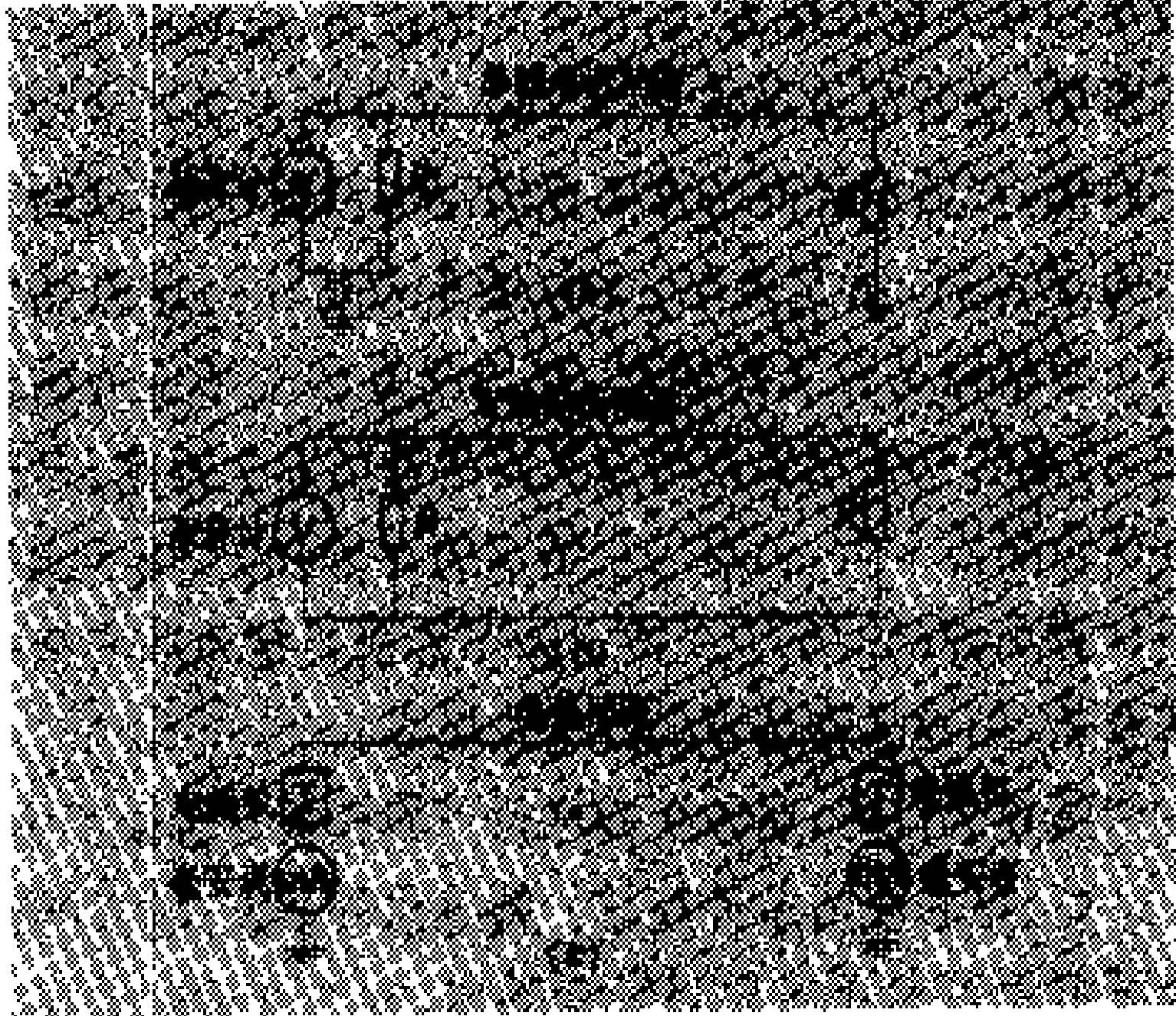
干扰影响计算原则 ①对于中性点直接接地系统的三相对称输电线路，计算其在正常运行情况下的不平衡电流（零序电流），相电流通过感性耦合和相电压通过容性耦合在电话回路上产生的杂音电动势及在电报回路上产生的干扰电流。②对于中性点不直接接地系统的三相对称输电线路，计算其在正常运行情况下的相电流通过感性耦合和相电压通过容性耦合、在故障情况下的不平衡电压通过容性耦合在电话回路上产生的杂音电动势及在电报回路上产生的干扰电流。③对于三相不对称输电线路，计算其在正常运行情况下

的不平衡电流通过感性耦合、阻性耦合和不平衡电压通过容性耦合在电话回路上产生的杂音电动势及在电报回路上产生的干扰电流。④对于具有接地金属外皮的电缆线路，不必计算由于容性耦合产生的干扰影响。如在电话回路或电报回路上同时存在感性、容性和阻性耦合产生的杂音电动势或干扰电流时，其总的影响数值取各影响数值的几何和。

干扰影响测量 测量接线如图所示。

（1）电话回路杂音电动势测量。在电话回路一端采用杂音计进行测量，测量时线路应与终端设备断开，在线路两终端同时接入与电话回路特性阻抗同值的纯电阻  $R$ ，在电阻上测得的杂音计电压的两倍即为杂音电动势。由于杂音电动势的容许值是指线路终端接入特性阻抗为  $600\Omega$  时的数值，若电话回路的特性阻抗不是  $600\Omega$ ，终端接入的纯电阻  $R$  也不是  $600\Omega$  时，则所测得的杂音计电压须折算到  $600\Omega$  条件下的值。图（a）所示为单线电话回路杂音电动势测量接线，图（b）所示为双线电话回路杂音电动势测量接线。

（2）电报回路干扰电流测量。在电报回路的两终端串接交流毫安表进行测量，当两端毫安表测得的数值不同时，取其较大者。测量时两终端的电报机须串接在测量回路中。图（c）所示为电报回路干扰电流测量接线。



干扰影响测量接线图

（a）单线电话回路杂音电动势测量；（b）双线电话回路杂音电动势测量；（c）电报回路干扰电流测量

干扰影响防护措施 主要有：①在选择输电线路或电信线路的路径时，应保持合理的距离，或采用迁移线路的方法加大输电线路与电信线路间的距离；②将音频电话、普通电报改为载波电话、载波电报；③将单线电话、单线电报改为双线电话、双线电报；④将单幻电报改为双幻电报；⑤抑制输电线路谐波。在实际工程上须进行具体的技术经济比较确定采用何种防护措施。

参考书目

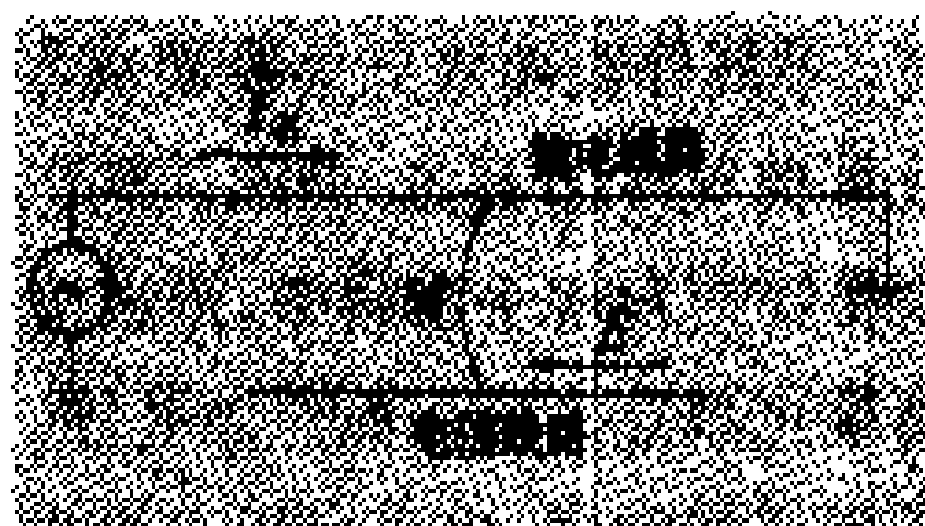
庞廷智等. 电力线路对电信线路的影响和保护. 北京:水利电力出版社,1986

(庞廷智)

shudian xianlu ganxing ouhe yingxiang

输电线路感性耦合影响 (inductance coupling effects of transmission lines)

输电线路在正常运行或接地短路故障情况下,导线上流过交变的工作电流或故障电流,从而在导线周围空间产生交变磁场。处在输电线路交变磁场作用区域内的其他线路(如电信线路),在其导线上将感应产生电动势及电压。因这个电动势是沿导线的纵方向存在的,故称纵电动势。



两单线大地返回线路间

该纵电动势和电压

感性耦合示意图

除基波外,还有谐波成分,并随输电线路电流的频率而变化,这是通过输电线路与其他线路导线间的互感耦合产生的,如图所示。这种互感耦合作用对电信线路产生的影响,称为感性耦合影响,简称磁影响。

由于感性耦合,输电线路在架空明线电信线路导线上和长度小于 40km 的电缆电信线路芯线上产生的感应纵电动势为

$$E = -j\omega MI_p K_m, V$$

式中  $I$  为输电线路电流, A;  $\omega M$  为两线路间的互感阻抗,  $\Omega/\text{km}$ ;  $M$  为互感系数,  $\text{H}/\text{km}$ ;  $\omega$  为角频率,  $\omega = 2\pi f$ ;  $l_p$  为两线路接近段长度,  $\text{km}$ ;  $K_m$  为综合磁屏蔽系数。

理论上,输电线路与电信线路间的全互感阻抗应由附近金属物体及地中引起的涡流损耗的有效分量和电抗分量合成(几何和),但对于架空明线电信线路,有效分量与电抗分量相比很小,可以忽略,说明感性耦合影响是通过输电线路与电信线路之间的互感耦合产生的。因此互感系数便成为感性耦合影响的重要参数,它主要取决于输电线路和电信线路的相对位置、双方导线在杆塔上的排列方式和对地平均高度。对于以大地作为回路的线路,互感系数在相当大的程度上还取决于大地导电率。因此,在不同地区和不同接近情况下便有不同的互感系数。互感系数计算是很繁杂的,通常都是从事先做好的诺模图或数值表查得所需的数值。

大地导电率对以大地作为回路的线路之间的互感系数影响很大。计算互感系数所用的大地导电率主要取决于较大深度(对于工频约为几百米)内的地质结构和地下水情况。大地的地质结构又决定着地中电流的

分布情况。尽管地中电流是分散的,但可以把分散的地中电流等效地集中于地下某一深度的等效导线上。感性耦合影响就是输电线路的地上导线电流影响和地下等效导线电流影响的合成。由于地上导线与地下等效导线中的电流方向是相反的,故由此产生的感性耦合影响将互相抵消一部分。大地导电率愈小,电流入地穿透深度愈大,即地下等效导线在地表下面的位置愈深,地上导线和地下等效导线电流影响的抵消程度愈小,感性耦合影响就愈大。电流频度愈高,由于类似实心导体中的集肤效应,其入地穿透深度就愈浅(见输电线路磁场),感性耦合影响就愈小。

大地一般为层状结构,非均匀同质,具有不同的导电层。不同频率的电流入地穿透深度不同,将沿着不同的地质导电层流动,故不同频率的总大地导电率将由各该频率的电流所流过的地质导电层的导电率来确定。对具有多层的非均匀的地质结构,测量得出的大地导电率是在电流场作用范围内各岩石导电率的综合反映,这种大地导电率称为视在大地导电率,常简称为大地导电率。

见输电线路危险影响。

参考书目

庞廷智等. 电力线路对电信线路的影响和保护. 北京:水利电力出版社,1986

高攸纲. 感性耦合与阻性耦合. 北京:人民邮电出版社,1979

(庞廷智)

shudian xianlu guzhang

输电线路故障 (transmission line faults)

输电线路的组成部件(导线、架空地线、绝缘子、金具、杆塔、基础、接地装置等),由于原有的电气、机械性能受到损坏,或导线与接地体之间的距离小于要求数值,从而造成的不正常运行状态或退出运行状态。输电线路故障分瞬时性故障和永久性故障两类。输电线路发生故障的原因有雷、风、雨、雾、冰雪、气温变化、洪水冲刷、地震等大自然影响;周围环境特别是环境污秽的影响;鸟类活动的影响;其他物体对输电线路的机械性破坏或对导线的接近、接触;部件材质不良或性能劣化;部件被拆卸偷盗、损坏等。为保持输电线路连续正常运行,对雷害、污害、导线机械伤害、绝缘子劣化、冰(雪)害、鸟害等引起的故障,须采取相应的防止措施。

雷害故障及防雷措施 输电线路故障中有相当一部分是由于雷害引起的。输电线路由于遭受雷击所引起的雷电过电压有雷直接击于线路引起直击雷过电压和雷击于线路附近因电磁感应引起的感应雷过电压两

种。当雷电过电压超过线路绝缘水平时,就会引起绝缘子串闪络或线间、线对接地体间闪络而发生故障。为防止和减少雷害故障,应全面考虑线路重要程度、系统运行方式、线路经过地区雷电活动强弱程度、地形特点和土壤电阻率,并结合原有线路运行经验,根据技术经济比较采取合理的防雷措施,使线路具有有关技术规程所规定的耐雷水平。通常可供选择采用的防雷措施有:①架设避雷线;②降低杆塔接地电阻;③架设耦合地线;④同杆架设的双回路线采用不平衡绝缘方式;⑤装设自动重合闸;⑥加强绝缘水平或利用木质绝缘。(见线路防雷)

**污害故障及反污措施** 当输电线路绝缘子表面附着有各种污秽物质(如灰尘、烟尘、化工粉尘、盐类等)时,在一定的湿度条件下(如有雾、结露或毛毛雨时),污秽物质溶解于水分中,形成电解质的覆盖膜,或有导电性质的化学气体包围着绝缘子时,都将会大大降低绝缘子的绝缘性能,致使绝缘子表面泄漏电流大大增加,导致绝缘子闪络或木杆燃烧,造成线路污害故障。污害故障又称为污闪故障(见污闪)。当大气中有雾时线路绝缘子所发生的闪络又称为雾闪。一般所说的污闪包括雾闪。污害故障的特点之一是与气候关系大,通常发生在雾或雨雪交加的季节,且在雾或空气湿度较大的清晨,所以也有人称之为“日出事故”;特点之二是由于某种气候条件发生在一个较大的面积范围内,且持续时间又较长,所以污闪往往同时在多条线路发生,并且可能连续多次发生,而且难以用自动重合闸恢复供电。反污措施有:①设计线路时查清线路周围环境的污染源和污秽程度,并充分考虑邻近线路运行经验,据以确定线路的环境污秽等级,从而选择相应的绝缘子串的爬电比距(见输电线路绝缘设计);②定期检测和及时更换不良绝缘子;③定期清扫绝缘子,并在易发生污闪的多雾季节来临前完成;④根据线路运行经验增加悬式绝缘子片数,采用防污型绝缘子或合成绝缘子;⑤绝缘子表面涂防污涂料,如硅脂、硅油、石蜡等。

**导线机械伤害故障及防止措施** 引起导线机械伤害故障的原因主要有:①微风(风速 $V \geq 0.5 \text{ m/s}$ )引起的振动(见架空线微风舞动)、电晕引起的电晕振荡(见输电线路电晕)、覆冰引起的舞动(见导线覆冰舞动)、冰雪脱落引起的跳跃(见导线脱冰跳跃)、中等风(风速 $V \geq 4 \text{ m/s}$ )引起的分裂导线次档距振荡(见导线次档距振荡)等。振动会造成导线疲劳断股,甚至断线;振荡、跳跃和舞动会造成导线间闪络,也会引起金具损坏和导线断股、断线。②连接接头施工质量不良或长期运行老化造成过热断线。③线材机械强度不够而断线。④线材有缺陷或在施工过程被磨损发生断股,遇荷载

增大时造成断线。⑤大风时,导线对杆塔放电或摆动周期不一,造成线间闪络使导线烧伤断股甚至断线。⑥对其他物体接近、接触造成闪络或造成机械伤害。防止的措施是:①周密正确的线路设计;②良好的线材质量和施工质量;③周密而认真的线路巡视、检测和维护检修。

**导线腐蚀及防止措施** 导线(包括架空地线)在大气中受水分、化学气体和盐类物质等作用会发生腐蚀,腐蚀程度与导线的材质成分和制造工艺有密切关系。导线的腐蚀形态有化学腐蚀和电化学腐蚀,并以电化学腐蚀为主,而且主要是外层腐蚀。当空气湿度较大时,导线外表而水分会凝聚成水膜,大气中的 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 及其他气体如 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{Cl}_2$ 、 $\text{HCl}$ 等和盐类物质溶解于水膜中,形成电解液薄层。电解液与金属氧化膜发生反应而产生孔蚀。在导线内部铝股与镀锌钢芯接触层,由于金属电极电位差异,也会产生接触腐蚀。铝股受腐蚀后表面会产生白色粉末,并布满麻点,铝股与钢芯接触层也会产生白色粉状物,同时导线明显变脆,抗拉强度明显降低,严重时会造成断股、断线。防止措施是:①提高导线线材的电工铝纯度,张拉均匀,股间致密,加工时要严防其他金属杂质污染,线股应光洁;②输电线路设计时,注意收集会导致导线和杆塔发生腐蚀的环境资料,如污源性质、范围、主导风向、风速等,尽可能避开污源或把线路置于主导风向的上风侧,还可要求化工厂、冶炼厂等污染源单位采取有效措施防止腐蚀性气体排放到大气中;③采用防腐型导线和铝包钢线,钢芯铝线的钢芯采用镀铝钢线,从而解决铝钢之间接触腐蚀问题。

**绝缘子劣化故障及防止措施** 绝缘子的绝缘性能和机械性能劣化,会造成导线对地放电及导线从杆塔上脱落造成线路故障。绝缘子劣化的主要原因是:①瓷件焙烧不良和水泥胶合剂干缩较大,导致瓷件产生空隙吸潮;②瓷体成型压力不均、冷却不良引起的内应力,以及由于瓷体、水泥、金具的热膨胀系数差异在温度变化时引起的内应力,使瓷体产生龟裂;③水泥吸收大气中的水分和水泥内部的水分反复冻结溶解、水泥化学膨胀所引起的内应力,使水泥劣化;④运输、施工或污闪、雷击使瓷体表而受到的损伤,因气温变化或导线振动引起的应力作用而发展;⑤悬式绝缘子钢脚被电化学腐蚀,产生腐蚀膨胀,使瓷体损坏,同时使钢脚机械强度大大下降。防止措施是:①提高绝缘子制造质量,安装前加强质量检查,防止受损的绝缘子投入运行;②对运行中的绝缘子定期进行检测,检出的不良绝缘子及时更换;③对绝缘子钢脚定期进行检查或抽查。(见输电线路巡视检测)

**冰(雪)害故障及防止措施** 导线和架空地线的温

度在零度以下时,从高空落下的雨点或湿雪附着其上,凝结成冰,而且越积越厚,厚的可达10cm以上。有时,也会在导线表面上结霜,霜的比重虽比冰小,但覆盖厚度比冰的大得多。由于覆冰(雪)引起的冰(雪)害故障的原因有:①因覆冰(雪)所增加的机械荷载超过设计允许值到一定程度时,造成断线、倒杆塔事故;②上下排列的导线,下部导线因覆冰(雪)脱落而发生跳跃,造成上下导线接近或碰线而闪络;③架空地线因无电流通过,温度低于导线,其覆冰厚度可能大于导线,而使其弧垂增大,缩小了与导线的距离,到一定程度时与导线之间发生闪络;④覆冰(雪)使导线、架空地线弧垂增大,由于线路各档内覆冰(雪)厚度不均匀,会使各档内导线弧垂变化相差很大,致使悬垂绝缘子串发生倾斜,导线弧垂过大造成对地面或交叉物的距离减小到危险的程度,甚至发生闪络;⑤绝缘子串覆冰(雪)降低了绝缘子串的绝缘水平,如果覆冰、积雪贯穿整串绝缘子,则会引起绝缘子闪络。防止措施是:①设计时考虑到覆冰(雪)增加的荷载,选择合理的气象组合条件(见输电线路设计用气象条件)。②沿导线每隔一定间隔装设一个特制的防冰(雪)塑料环,以阻止冰雪沿导线绞合方向逐渐发展成连续的圆筒状冰柱。加装防冰环后当冰雪发展到环处被阻挡,使冰(雪)继续增厚,直至脱落。③加大负荷电流或用短路电流来使导线温度升高,使覆冰(雪)熔解。用短路电流来融化覆冰(雪),需有专用设备,制定特别措施,将线路一端三相短路,另一端用专用变压器或发电机供给短路电流。④用机械方法除冰(雪),但一般要求线路停电。如线路不允许停电,则可采用绝缘工具和滑车式除冰器除冰。用机械方法除冰时要防止导线和架空地线受到损伤。

**鸟害故障及防止措施** 由于鸟类的嘴里含着树枝、柴草和铁丝等往返飞行于线路上空,树枝落到导线间或搭到导线与横担之间因而造成短路或接地事故。体型较大的鸟类在线间飞行或鸟类打架也可能造成短路事故。鸟巢被风吹散触及导线会造成接地、短路等事故。防止鸟害的措施主要是增加巡线次数,随时拆除鸟巢,安装惊鸟设施等。

(王之珮)

shudian xianlu huanjing dianci

**输电线路环境电磁** (electromagnetic environment of transmission line) 见输配电电磁与环境影响。

shudian xianlu jishu jingji zhibiao

**输电线路技术经济指标** (technical & econ-

omical indexes of transmission line) 输电线路工程设计中衡量其技术效果与经济效益的概括性数据,用以作宏观比较与概括估计。输电线路技术经济性,首先表现在电力系统规划中对组成的电力网所起的安全经济作用,使电力网在运行中能充分发挥其输电容量的能力,尽可能减少电力网损失。电力系统规划中的网络结构、电压选择及导线截面的确定,对于输电线路的安全经济性起主导作用。

在输电与联网可行性研究的计划任务决策以后,输电线路本身的技术经济性,可以用以下指标表示:输电线路建设总投资、单位长度投资、本体工程投资、本体工程单位长度投资、线路长度、曲折系数、杆塔类型比例、档距利用系数以及主要材料消耗等。在列举指标的同时,还应说明本工程采用的主要气象数据,如风速、结冰厚度以及沿线地形情况,以便对各项指标的先进性作出正确的评估。

**输电线路建设总投资** 输电线路建设综合投资费用。总投资的构成,包括线路本体工程建设投资、线路辅助生产工程建设投资、生活福利工程建设投资、场地准备费用投资、生产准备费用投资和其他工程及费用投资。从构成上分析输电线路建设总投资,其目的是分析投资的合理性、造价分配比例的合理性,并掌握输电线路投资的经济规律。输电线路本体工程、辅助生产工程和生活福利工程造价的计算,均包括各自工程的直接费、其他直接费、间接费、计划利润和税金。

**单位长度投资** 输电线路每千米建设的综合投资。它是衡量线路工程造价经济合理性的主要指标。

$$\text{单位长度投资} = \frac{\text{输电线路工程建设总投资}}{\text{线路长度}}, \text{元/km}$$

**本体工程投资** 其构成包括工地运输工程费用、土石方工程费用、基础工程费用、杆塔工程费用、导线及避雷线工程费用、金具及绝缘子工程费用和接地工程费用。从投资构成上分析线路本体工程投资,其目的是分析投资的合理性、本体造价构成分配比例的合理性,并掌握其经济规律性。

**本体工程单位长度投资** 输电线路本体工程每千米的建设投资。

$$\text{本体工程单位长度投资} = \frac{\text{输电线路本体工程投资}}{\text{线路长度}}, \text{元/km}$$

**输电线路长度** 线路端门型构架至另一端门型构架的距离,又称亘长。长度计算是指各耐张段的长度总和,或各杆塔之间水平距离的总和。输电线路特殊大跨越段长度是指跨越段两侧耐张塔之间的长度(水平距离)。

输电线路曲折系数 输电线路实际长度与理想的最短距离之比。

$$\text{线路曲折系数} = \frac{\text{输电线路长度}}{\text{输电线路直线距离}}$$

输电线路直线距离指输电线路两端的航空直线距离。

杆塔类型比例 工程所用主要杆塔类型、杆塔总数,直线型、耐张型、转角型杆塔各占的百分比,直线杆塔中自立塔、拉线塔、水泥杆各占的百分比。

档距利用系数 输电线路工程的平均档距占计算档距的百分数。

$$\text{档距利用系数} = \frac{\text{平均档距}}{\text{计算档距}} \times 100\%$$

一条线路中使用不同高度的杆塔,档距利用系数按加权平均计算。档距利用系数,直接影响工程的经济性,它与地形、地貌有关,用以进行综合分析以确定设计的先进性与合理性。

输电线路主要材料消耗指标 输电线路工程建设的主要材料包括:导线和地线(施工损耗之外,要加弧垂需用量)、杆塔钢材、基础钢材、基础混凝土和绝缘子。

$$\frac{\text{线路单位长度的主要材料消耗量}}{\text{线路总长度主要材料耗用量+施工损耗量}} = \frac{\text{线路长度}}{\text{线路长度}}$$

(沈长荣)

shudian xianlu jiaocha kuayue

**输电线路交叉跨越** (transmission line crossings) 输电线路与其他线路如电信线、电力线、管道、索道、铁路、公路等相交,形成水平交叉角度的,称为交叉。输电线穿越房屋、建筑、果树、林木、河流等物体,称为跨越。但一般并不严格区分,通常对所有各种交叉也统称为交叉跨越。输电线路与河流或各种工程设施有交叉跨越时,为保证双方都能安全运行,必须遵守国家或有关主管部门制定的规定。

根据被交叉跨越物的重要程度不同,输电线路交叉跨越通常分为两类:第一类包括标准轨距铁路、电气化铁路、1~2级公路、城市1~2级道路和电车道、主要通航河流、1~2级电信线、1级电力线、特殊管道及索道等;第二类包括居民区、窄轨铁路、3级及以下公路、城市3级道路、次要河流、3级电信线和2级电力线等。

按照上述被跨越物的不同类别,对输电线路的交叉跨越也有不同的要求:

(1) 跨越杆塔及线夹型式。跨越一、二类设施时,允许采用直线型杆塔,除跨越主要通航河流外,

均要用固定型线夹。

(2) 导线及架空地线接头。跨越一类设施时,导线及架空地线不得接头,跨越二类设施时不作限制。

(3) 邻档断线情况检验。跨越一类设施时,除通航河流、电力线路及索道外,均应检验邻档断线后跨越档导线对被跨越物的交叉垂直距离,但如跨越杆塔采用固定横担,导线截面为150mm<sup>2</sup>及以上时,可不作检验。对跨越二类设施均不作检验。

(4) 水平交叉角。对一级通信线的水平交叉角应不小于45°,对二级通信线的水平交叉角应不小于30°,跨越其他设施不作限制。

(5) 导线弧垂最低点校验。输电线路与标准轨距铁路或一级公路交叉,校验导线弧垂最低点对轨顶或路面的垂直距离时,如交叉档距超过200m,弧垂应按导线温度为70℃计算。其他交叉情况仍按最高气温计算。

(6) 跨越杆塔位置。输电线路的跨越杆塔位置与被交叉跨越物之间,要按SDJ3《架空送电线路设计技术规程》的规定保持一定的水平距离。

(7) 交叉跨越线路的相对布置。输电线路与电力线或电信线交叉跨越时,强电线路应架设在弱电线路上方,电压较高的线路架设在电压较低的线路上方。

(8) 与管道、索道交叉的要求。输电线路与管道、索道交叉时,管道、索道应接地,交叉点不应选在管道的检查井处。与索道交叉时如果索道在上方,索道的下方应加装保护措施。

(唐在德)

shudian xianlu jiedi sheji

**输电线路接地设计** (grounding design of transmission line) 见接地装置。

shudian xianlu jueyuan sheji

**输电线路绝缘设计** (insulation design of transmission line) 在保证安全经济的原则下,合理选配输电线路的绝缘强度,从而确定绝缘子的数量和各带电体与接地体之间以及不同相的带电体之间的空气间隙,也包括带电体与线下物体及与地面之间的空间距离的全过程。架空输电线路的绝缘水平应与电力系统整体绝缘配合的要求相适应,综合考虑工程造价、运行维护费用以及供电可靠性要求等因素,根据线路的具体情况,选择不同的绝缘水平。输电线路的绝缘强度应满足在运行中可能遇到的下列三种情况的要求:①正常运行电压,即长期作用于线路上的工作电压;②内部过电压,主要考虑系统中开关操作时电弧重

燃或熄灭所引起的过电压;③大气过电压,即雷击线路或其附近时雷电冲击产生的过电压。在上述三种情况下,输电线路均应保持足够的绝缘强度,并将绝缘闪络所引起的故障控制在一定限度之内。

**输电线路的绝缘** 架空输电线路的基本绝缘介质是空气和绝缘子。空气具有良好的绝缘性能,它在带电导线与地面、与交叉跨越物以及与通过线下的车辆和机械之间保持足够的电气距离,并在导线与杆塔构件之间、导线与架空地线以及不同相导线之间形成绝缘间隙。绝缘子则作为线路的组成元件,将导线固定或悬挂在杆塔上,并保证在各种气象条件下以及在正常工作电压和过电压情况下,均能保持足够的电气强度和可靠的机械强度。

空气和绝缘子在发生闪络后,都具有自恢复的特性。所以从既能够保证必要的运行可靠度又符合经济合理原则考虑,输电线路绝缘设计可以根据过电压出现的概率和绝缘闪络的概率,采用数理统计的方法进行。但由于出现各种过电压引起绝缘击穿、造成线路跳闸的因素很复杂,要全面、完整地进行概率分析计算是很困难的。工程设计中根据模拟或实际系统测试,结合运行经验,采用一部分假设数据以确定设计参数进行设计,这种方法称为绝缘配合简化统计法。

**输电线路绝缘子** 按其结构不同有针式、盘形悬式和棒形三种基本型式。

**针式绝缘子** 用于电压比较低的电力线路上,是架空输电线路发展初期首先采用的绝缘子型式,其构造如图1所示。瓷体的一端绑扎固定导线,另一端装有钢脚,以便将绝缘子安装在横担上。根据使用电压的高低以及机械荷载的大小,确定瓷体的直径、高度和瓷裙层数等规格,并形成系列。针式绝缘子一般只用于35 kV及以下电压的配电线路上,对更高的电压等级,针式绝缘子制造比较困难,并且重量加大,价格也将提高,难以与悬式绝缘子竞争。(见支柱绝缘子)

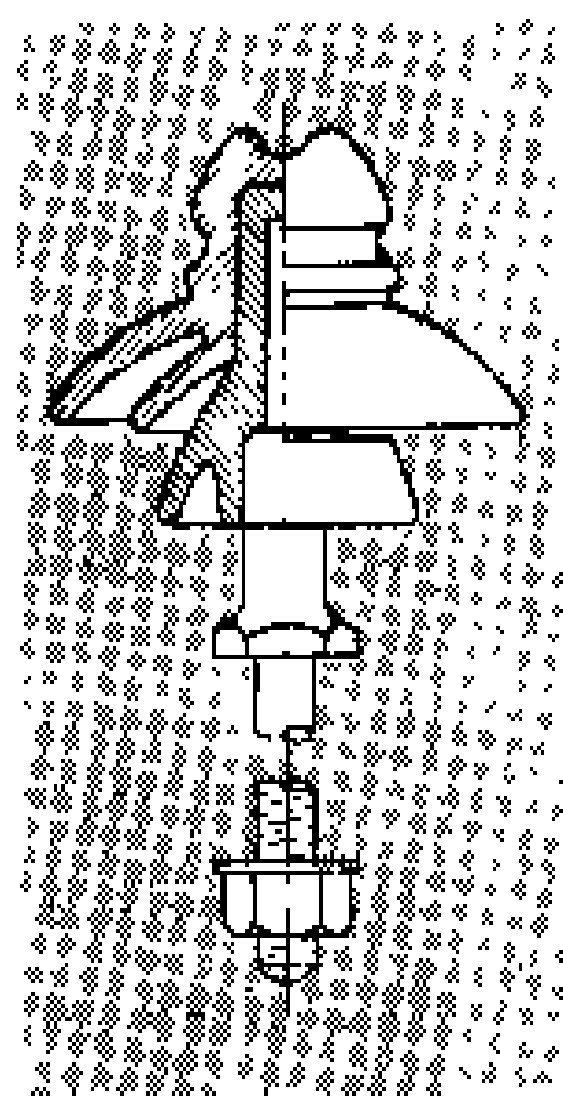


图1 针式绝缘子

**盘形悬式绝缘子** 高压输电线路中最广泛使用的绝缘子型式,结构如图2所示。瓷体上下的钢帽和钢脚用水泥等粘合剂和瓷体牢固粘结,瓷体在运行中处于挤压状态。盘形悬式绝缘子构造简单,电气和机械性能都比较好,本身电容较大,因而电压分布比较合理。可以用它组成适合于各种电压等级线路所需要的绝缘子串。相邻绝缘子之间通过钢脚端部的球头与钢帽上的碗状槽孔相连接,装好后用销钉锁住,防止松脱。盘形

悬式绝缘子的设计、安装和更换都很灵活方便,机电破坏荷载较大(约70~300 kN),可供高压和超高压线路选用。其外形主要尺寸,除图2所表示的高度 $H$ 和盘径 $D$ 之外,泄漏距离 $L$ 对沿表面闪络特性关系很大,增大 $L/H$ 值对提高污闪电压具有实际意义。(见悬式绝缘子)

**棒形绝缘子** 其瓷体是带伞裙的实心圆柱,两端带有金属连接件,结构如图3所示。圆柱瓷体的直径大小由所需要的机械强度决定,棒长和伞裙数目以及伞径则根据不同电压等级要求而定。棒形绝缘子金属连接件少、结构简单,电气性能好,不易击穿。一般高压输电线路每相用一只,超高压输电线路可用多只串联组合。但棒形绝缘子是靠瓷体承受拉力的,为保证很大的抗拉强度,其制造难度较大。此外,棒形绝缘子一旦损坏,需要整根更换,不像盘形悬式绝缘子可以单片更换。(见支柱绝缘子)

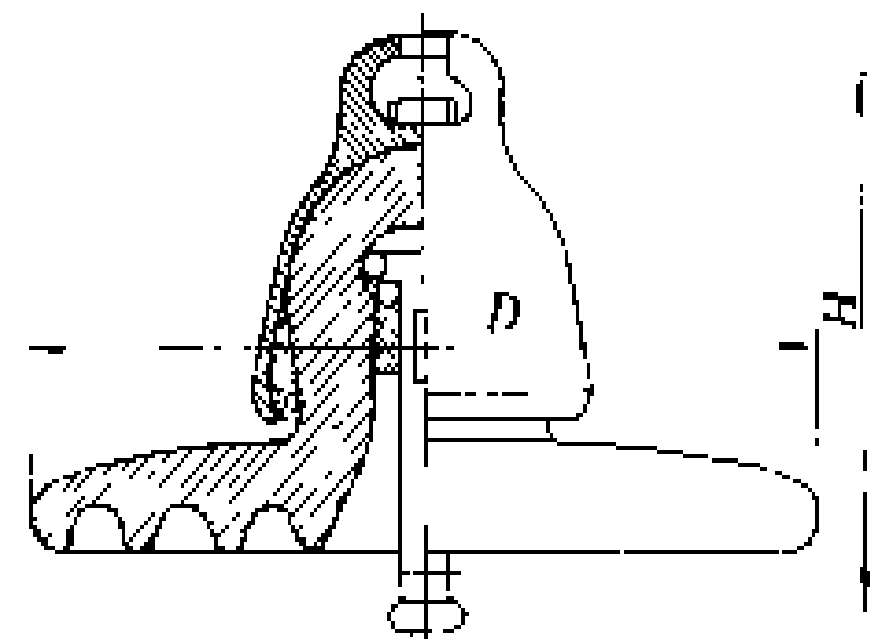


图2 盘形悬式绝缘子



图3 棒形绝缘子

绝缘子的材质必须具备架空线路运行中所要求的电气和机械特性,并且在大气条件变化时有足够的稳定性。瓷和玻璃都具有这些性能。早期多用瓷绝缘子,后来也采用钢化玻璃绝缘子。钢化玻璃绝缘子的特点是运行过程中不必定期进行带电检测,一旦损坏,玻璃体自行炸碎,巡线时容易发现,并且炸碎的玻璃残片仍能卡住钢帽和钢脚以承受机械荷载,不致断串落地。瓷和玻璃绝缘子都存在重量大、易破损、表面积污清扫工作繁重、制造工艺复杂等缺点。近期发展起来的合成绝缘子则具有尺寸小、重量轻、运输安装方便的特点,特别是耐污性能好,用在严重污秽地区,可以减少污闪事故,并减轻维护清扫的工作量。(见绝缘子)

**绝缘子串设计** 根据绝缘子串的放电特性,计算选择绝缘子串中绝缘子的安装片数。绝缘子串的放电特性主要包括:①工频干闪络电压。指在正常大气条件下,施加工频电压时引起绝缘子串击穿或闪络的最低电压。它用以表达正常运行电压下绝缘子串的绝缘强度。②工频和操作冲击波湿闪电压。指在人工淋雨条件下,施加工频和操作冲击电压时引起绝缘子串击穿或闪络的最低电压。它用以表达绝缘子串在降雨情况下,承受正常运行电压和操作过电压的闪络特性。③雷电

冲击放电电压。指在模拟线路遭受雷击时,绝缘子串的闪络特性。闪络时间与闪络电压值的关系称为伏秒特性,通常用曲线表示。绝缘子串中绝缘子的片数,通常是按正常运行电压选择,并按操作过电压验算,再按雷电过电压进行复核的。

按正常运行电压选择 输电线路在运行中绝缘子表面积污,遇到潮湿,在正常工作电压下可能沿介质表面发生闪络。绝缘子串具有一定的爬电比距,是防止污闪的必要保证。按此条件选择绝缘子片数的公式为

$$n \geq \frac{dU_n}{K_x \lambda} \tag{1}$$

式中  $n$  为每串绝缘子的片数;  $d$  为爬电比距,  $\text{cm/kV}$ ;  $U_n$  为线路额定电压,  $\text{kV}$ ;  $\lambda$  为每片绝缘子的爬电距离,  $\text{cm}$ ;  $K_x$  为绝缘子爬电距离的有效系数。根据运行经验,一般干净地区,当  $d$  值不小于  $1.6 \text{ cm/kV}$  时,污闪跳闸率是很低的,如配合以适当的清扫维护措施,能够保证线路安全运行。对于空气中含有工业污移或接近海岸、盐湖等易受盐雾侵袭以及土壤中含有大量盐碱的地带,则需根据污染情况,增大绝缘子串的爬电比距。电力工业比较发达的国家一般都根据本国实际情况和经验,制定输电线路和电气设备的外绝缘污移等级标准。有些国家还进行全国污区划分,以指导输电线路建设和运行维护工作。中国原水利电力部 1983 年颁布的《高压架空线路污移分级标准》如表所示。该标准规定污移等级的划分是由污湿特征、运行经验、外绝缘表面污移物质的等值附盐密度三个因素综合考虑决定的。当三者不一致时,应按运行经验决定。

按操作过电压验算 在操作过电压短时间作用下的线路绝缘强度,可用绝缘子串的工频湿放电电压和操作冲击波 50%湿放电电压表示。按最大操作过电压和绝缘子串的最低湿闪电压相配合的绝缘配合惯用法考虑,验算公式为

$$U_w = K_1 K_0 \sqrt{2} U_{pm} \tag{2}$$

式中  $U_w$  为绝缘子串的工频湿闪电压、操作冲击波 50%湿闪电压峰值,  $\text{kV}$ ;  $K_1$  为绝缘子串操作过电压湿闪综合校正系数;  $K_0$  为操作过电压倍数;  $U_{pm}$  为线路最高运行相电压,  $\text{kV}$ 。各级电压线路的操作过电压倍数为: 非直接接地系统,  $35 \sim 60 \text{ kV}$  及以下电压为 4.0,  $110 \sim 150 \text{ kV}$  电压为 3.5; 直接接地系统,  $110 \sim 220 \text{ kV}$  电压为 3.0,  $330 \text{ kV}$  电压为 2.75,  $500 \text{ kV}$  电压为 2.0。

按雷电过电压复核 绝缘子串应具有一定的冲击耐电强度,以保证线路有足够的耐雷水平。带架空地线的输电线路一般应具有以下耐雷水平:  $35 \text{ kV}$ ,  $20 \sim 30 \text{ kA}$ ;  $60 \text{ kV}$ ,  $30 \sim 60 \text{ kA}$ ;  $110 \text{ kV}$ ,  $40 \sim 75 \text{ kA}$ ;  $154 \text{ kV}$ ,  $90 \text{ kA}$ ;  $220 \text{ kV}$ ,  $80 \sim 120 \text{ kA}$ ;  $330 \text{ kV}$ ,  $110 \sim 140 \text{ kA}$ ;

$500 \text{ kV}$ ,  $120 \sim 160 \text{ kA}$ 。提高线路的耐雷水平,一般采用降低线路接地电阻和自动重合闸等措施,不宜增加绝缘子片数。因为单靠增加绝缘子片数,效果不大,经济上不合算。

高压架空线路污移分级标准

污移等级	污 移 条 件		爬电比距 (cm/kV)	
	污 湿 特 征	等值附盐密度 (mg/cm <sup>2</sup> )	中性点直接接地	中性点非直接接地
0	大气清洁地区及离海岸 50 km 以上地区	0 ~ 0.03 (强电解质) 0 ~ 0.06 (弱电解质)	1.6	1.9
1	大气轻度污染地区或大气中等污染地区: 盐碱地区, 炉烟污移地区, 离海岸 10 ~ 50 km 地区, 在污闪季节中干燥少雾 (含毛毛雨) 或雨量较多时	0.03 ~ 0.10	1.6 ~ 2.0	1.9 ~ 2.4
2	大气中等污染地区: 盐碱地区, 炉烟污移地区, 离海岸 3 ~ 10 km 地区, 在污闪季节中潮湿多雾 (含毛毛雨) 但雨量较少时	0.05 ~ 0.10	2.0 ~ 2.5	2.4 ~ 3.0
3	大气严重污染地区: 大气污移而又有重雾的地区, 离海岸 1 ~ 3 km 地区及盐场附近重盐碱地区	0.10 ~ 0.25	2.5 ~ 3.2	3.0 ~ 3.8
4	大气特别严重污染地区: 严重盐雾侵袭地区, 离海岸 1 km 以内地区	> 0.25	3.2 ~ 3.8	3.8 ~ 4.5

空气间隙的确定 架空输电线路的导线对杆塔、拉线等接地体之间的空气间隙应满足线路在运行中可能出现的下列三种情况。

(1) 最高运行电压, 同时出现最大设计风速时, 空气间隙应符合式 (3) 的要求, 即

$$U_{g0} = K_2 U_{pm} \tag{3}$$

式中  $U_{g0}$  为考虑风偏后空气间隙的工频放电电压,  $\text{kV}$ ;  $K_2$  为空气间隙运行电压综合校正系数。

(2) 操作过电压, 同时出现 50% 设计最大风速时, 空气间隙应符合式 (4) 的要求, 即



$$U_{ne} = K_2 K_0 \sqrt{2} U_{pm} \quad (4)$$

式中  $U_{ne}$  为按操作过电压要求考虑风偏后空气间隙的工频放电电压或操作冲击波 50% 放电电压峰值, kV;  $K_2$  为空气间隙内过电压放电电压的综合校正系数;  $K_0$  为操作过电压倍数。

(3) 大气过电压情况下, 空气间隙应与绝缘子串的 50% 冲击放电电压的 0.85 倍相配合。带有架空地线的输电线路, 为防止雷击档距中央的地线时反击导线, 档距中央的导线与地线之间应保持一定的空间距离, 一般可按式 (5) 计算, 即

$$S_1 = 0.012l + 1 \quad (5)$$

式中  $S_1$  为导线与地线之间的空间距离, m;  $l$  为档距长度, m。计算时采用大气过电压相应的风速, 气温一般取 15℃。

在海拔 1000 m 以上地区, 由于空气密度明显降低, 线路绝缘应进行海拔影响的修正。海拔每增高 100 m, 绝缘子增加一片, 空气间隙增大 1%。

**线间距离和对地距离选择** 架空输电线路档距中央不同相导线间的距离应满足导线不同步摆动的情况下发生相间过电压时也不致于发生闪络的要求。因为导线的不同步摆动理论计算困难, 一般均按运行经验确定。中国《架空送电线路设计技术规程》推荐 1 km 以下档距的水平线间距离为

$$D = 0.4L_k + \frac{U}{110} + 0.65 \sqrt{f} \quad (6)$$

式中  $D$  为导线水平线间距离, m;  $L_k$  为悬垂绝缘子串长度, m;  $U$  为线路电压有效值, kV;  $f$  为导线最大弧垂, m。当导线呈三角形排列时, 其等效水平线间距离为

$$D_x = \sqrt{D_p^2 + \left(\frac{4}{3}D_s\right)^2} \quad (7)$$

式中  $D_x$  为导线三角排列的等效水平线间距离, m;  $D_p$  为导线间水平投影距离, m;  $D_s$  为导线间垂直投影距离, m。式 (6) 和式 (7) 均为经验公式。

架空输电线路绝缘设计还应考虑导线对地面或对交叉跨越物的垂直距离, 以及导线在风偏时对与其接近的建筑物之间的距离。导线对地距离是为了保证线路安全运行, 并保证通过线下的人、畜、车辆、机械的安全。对各种交叉跨越物以及与线路接近的建筑物的距离也是保证双方安全所需要的。有关技术规范对此两项要求作了具体规定, 考虑的原则是: 导线处于最高气温或最大覆冰, 出现最大弧垂时, 导线与线下物体之间保持各种过电压所要求的空气绝缘间隙距离。对农田地区要考虑农业机械的高度; 对树木要考虑其自然生长高度; 对公路和铁路除考虑导线对路面或轨顶的距离外, 还应计及车辆的高度, 并留有一定的裕度。对

地面距离, 按居民区、非居民区、交通困难地区以及人员不易到达的山坡等不同情况, 分别规定最小安全距离, 如 220 kV 线路导线对地面最小距离, 在居民区为 7.5 m, 在非居民区为 6.5 m, 交通困难地区为 5.5 m, 步行不能到达的山坡和峭壁为 4.0 m 等等。

#### 参考书目

张纬敏, 高玉明. 电力系统过电压与绝缘配合, 北京: 清华大学出版社, 1988

(黄志明)

shudian xianlu jueyuanzi

**输电线路绝缘子** (insulators of transmission line) 见绝缘子、输电线路绝缘设计。

shudian xianlu keting zaosheng

**输电线路可听噪声** (audible noise of transmission lines) 高压输电线路运行时伴随电晕放电所发出的爆裂声和交流声的统称。电压等级较低的输电线路, 噪声问题不突出。随着电压等级的提高, 特别是在导线潮湿的条件下, 输电线路噪声成为一种环境问题。对于特高压输电线路, 噪声成为线路设计的主要控制因素之一。

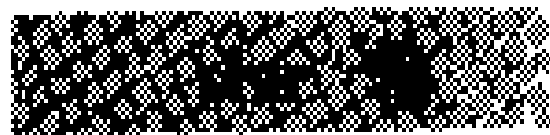
高压输电线路由电晕产生的可听噪声有两种, 即宽频带噪声和 100 赫及其整数倍的纯音 (又称交流声)。宽频带噪声为一种嘶嘶和啪啪的爆裂声响, 纯音为按一定频率起伏的嗡嗡声。(见输电线路电晕)

宽频带噪声是导线表面电晕放电产生的杂乱无章的电流脉冲所造成的, 特别是在交流电压正半波时的正极性电晕电流脉冲流注阶段最为严重。交流声是导线周围正、负离子在一周波内往返运动所造成的。由于正负离子到达和离开导线表面的这种运动, 使周围气压每半周内变换两次方向, 从而产生 100 Hz 或 200 Hz 的嗡嗡声。

天气条件对输电线路可听噪声的影响很大, 好天气时噪声小, 坏天气时 (如雨天、雾天、下雪天) 可听噪声增大。不同气象条件下, 无规则噪声和交流声的相对数值也不同, 雨天无规则噪声大, 而结冰时交流声大。对于一般高压输电线路来说, 引起人们烦恼的, 主要是无规则噪声, 其次是 100 Hz 或 200 Hz 的交流声。

高海拔下空气击穿场强低, 电晕放电会加强。海拔高度每增加 300 m, 可听噪声大约增加 1 dB。

由于人对噪声的感觉与频率关系很大, 直接测量声压不能反映人对噪声的烦恼程度。因此, 可听噪声水平通常是用经过模拟人耳对纯声响应的“A 频率计权网络”加权后的分贝值 [dB (A)] 来表示, 并把人能听到的 1000 Hz 的最低声压 20 μPa 作为基准声压。



输电线路的可听噪声和其他噪声相比,造成的烦恼程度要大。可听噪声每降低 10dB,人耳听到的声音约降低一半左右。

随着离开输电线路横向距离的增加,可听噪声的衰减较无线电干扰的衰减要慢。横向距离增加一倍,可听噪声降低约 3~4 dB。靠近输电线路的树木、建筑物和其他大型物体对输电线路的可听噪声都有降低作用。

新投运的输电线路在开始运行的前 6 个月左右可听噪声会比较高,随着运行时间增加,可听噪声逐渐减小,趋于稳定。

对于交流 500 kV 及以下的输电线路,所选导线如能满足无线电干扰限值的要求,也自然满足可听噪声限值的要求。对于 500 kV 以上的交流输电线路,可听噪声的限制将对导线结构的确定起到重要的作用。

(邵方殷)

shudian xianlu lujing xuanze

**输电线路路径选择** (transmission line routing)

在线路起迄点之间选择一条技术上安全可靠、经济上合理的路径,简称选线。为了给线路施工和运行维护创造较好的条件,在线路选线时,要考虑沿线气象、水文、地质、地形等自然环境以及交通运输、居民点等因素,还要妥善处理线路附近其他设施、城乡建设、文物保护、资源开发等方面的关系。按照国家现行法令、政策,进行综合论证比较,选出最佳的路径方案。路径选择不当,将导致线路建设发生困难,增加工程投资,不利长期安全运行,甚至对周围其他设施或居民生活产生不良影响。所以,选线是输电线路建设中涉及技术、经济和社会公共关系的一项重要工作。

输电线路路径选择的基本要求是:

(1) 路径长度要短,与起迄点之间的直线距离相比,曲折系数愈小愈好。

(2) 尽量减少线路转角次数和减小转角的角度,避免出现 60°以上的大转角。

(3) 转角点的地形要较好,两个转角点间的距离愈远愈好。

(4) 线路沿线交通条件较好,距离公路或通航河道较近。

(5) 沿线地形、地质、水文、气象条件较好,尽可能避开圩地、涝区、地质不稳定地带、地震烈度六级以上地区、严重覆冰区、原始森林区、风口及严重影响线路安全运行的其他地区等。

(6) 少拆房屋,少砍林木,注意保护名胜古迹、绿化地带和大量果树等经济作物。

(7) 对发电厂与变电所的进出线走廊作统一规划。

(8) 按照系统规划要求,预留可能出现的其他平行线路路径,以免影响今后线路建设,特别在狭窄通道处这一点更为重要。

(9) 处理好输电线路与有关障碍物的关系,与城乡规划、通信、航空、铁道及航运等部门取得协议。

(10) 若线路路径中无法避开特大跨越,由于特大跨越的技术复杂,工程量和投资大,一般先选好跨越地点,然后再定出整条线路的路径。

输电线路路径选择通常分室内图上选线和现场实地选线两步进行。

图上选线 首先了解输电线路的电压等级、回路数、可能使用的杆塔型式、两端起迄点与经过的地域以及有关的电力系统发展规划;其次在 1:50000 或 1:100000 的地形图上标出大致线路走向,搜集沿线有关的城乡规划、军事设施、工矿与水利建设、地下资源开采范围、林业与经济作物情况、已有电力线、铁路、通信线与重要管线、无线电收发信台位置、飞机场跑道及导航台位置、沿线水文地质情况以及交通与航运条件等资料;然后按经济、合理、安全的原则,在地形图上选定几个路径方案,同时进行沿线大地导电率测量,计算按系统远景规划的短路电流对铁路与通信线的干扰影响;最后作出各方案的技术经济初步比较。

若线路路径所经地区的地形、地质比较复杂,线路走廊狭窄,或有特大跨越地段等情况,则在图上选线前后,需进行实地重点踏勘。

国外在长距离输电线路选线工作中,已广泛使用航测照片进行刺点定线,这种方法比用一般地形图更为精确可靠。中国在 20 世纪 80 年代 500kV 架空输电线路的选线中,也开始应用航测技术。

现场选线 使用符合精度要求的测量仪器在现场确定线路的中心线走向和转角位置。其目的是使图上选线的所选路径在现场得以检验和落实。现场选线时,详细调查沿线与线路有影响的障碍物情况,核对应图上标示的正确性,按照有关规定,使线路与障碍物保持一定距离。通过现场选线,修正图上路径方案,进行各方案的技术经济比较,提出推荐的路径方案。若使用航测照片选线,也必须到现场调查落实,这项工作可以结合现场定线进行。

(1) 现场选线尚应注意对地形地质复杂地区、狭窄走廊地带及重要的交叉跨越地点,进行比较详细的勘测,基本上达到定线的要求。对一般开阔地区,可以较粗略地定出线路走向及转角位置,待定线时再作局部修正。线路转角位置对线路的合理性、经济性和安全性至关重要,不宜选在高山顶或深沟、河道、堤坝、悬崖的边缘、坡度较大的山坡或洼地积水处,能将耐张段长度与耐张塔结合考虑更佳。

(2) 跨越通航的大江、大河或其他重要设施,应确定跨越杆塔的位置,估算跨越杆塔的高度。对特大跨越地点,尚需在测量、地质、水文等方面作详细勘察工作,然后才能确定跨越杆塔的位置。

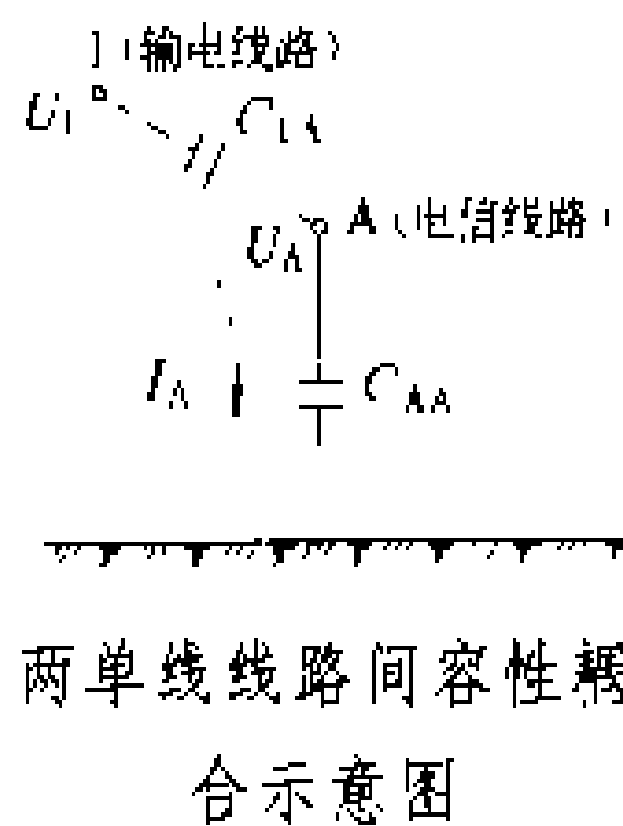
(3) 调查清楚沿线道路、河流、交通运输、房屋拆迁、林木砍伐、青苗赔偿和砂石供应等情况,以便正确估算线路建设费用,使线路方案的经济比较落实可靠。

(4) 对线路有影响的其他公共设施,在现场选线时尽可能与有关单位取得书面协议。

(唐在德)

## shudian xianlu rongxing ouhe yingxiang 输电线路容性耦合影响 (capacitance coupling effects of transmission lines)

输电线路在正常运行情况下的工作电压或故障情况下的不平衡电压作用下,在导线周围空间产生交变电场。处在输电线路交变电场作用区域内的其他线路(如架空明线电信线路),在其对地绝缘的导线上将产生感应电压和电流。



该电压和电流除基波外,还包含各种谐波成分,这是通过输电线路与其他线路间的电容耦合产生的,如图所示。这种耦合作用对电信线路产生的影响,称为容性耦合影响,简称电影响。

由于容性耦合,输电线路在电信线路导线上产生的感应电压和电流为

$$U_A = U_1 \frac{C_{1A}}{C_{AA} + C_{1A}}, V \quad (1)$$

$$I_A = U_1 \omega \frac{C_{AA} \cdot C_{1A}}{C_{AA} + C_{1A}}, A \quad (2)$$

式中  $U_1$  为输电线路的对地电压, V;  $C_{AA}$  为电信线路的对地电容, F/km;  $C_{1A}$  为两线路之间的互电容(又称耦合电容), F/km;  $\omega$  为角频率,  $\omega = 2\pi f$ 。

理论上互电容应为输电线路与电信线路间电耦合的互导纳,其中有直接耦合的实数分量和电容耦合的虚数分量。对于架空明线电信线路,实数分量远小于虚数分量,故实数分量可以忽略;虚数分量即为耦合电容,说明容性耦合影响是通过输电线路与电信线路之间的电容耦合产生的。互电容的数值大小取决于输电线路和电信线路的自有电位系数及两线路间的互有电位系数。某导线的自有电位系数是指仅当该导线上有单位电荷而其余各导线上的电荷均为零时,该导线上所应有的电位。线路两导线 a 和 b 间的互有电位系数是指仅当导线 a 上有单位电荷而其余各导线上的电荷

均为零时,导线 b 在该系统中应有的电位。由于输电线路和电信线路的自有电位系数大致相等,且变化不大,可取为一常数(一般取为 9),故互电容只随互有电位系数变化。因此,互有电位系数就成为容性耦合影响的重要参数,从而称它为容性耦合系数。

容性耦合系数既是输电线路和电信线路间的互有电位系数,则其大小取决于输电线路和电信线路的相对位置、双方导线在杆塔上的排列方式和对地平均高度。因此,在两导线不同接近情况下便有不同的容性耦合系数,其数值都是根据所计算的导线系的电压、电荷和电位系数关系组成的麦克斯维尔方程组的解来确定的。通常采用镜像法求解容性耦合系数。

见输电线路危险影响。

### 参考书目

庞廷智等. 电力线路对电信线路的影响和保护. 北京: 水利电力出版社, 1986

(庞廷智)

## shudian xianlu sheji yong qixiang tiaojian 输电线路设计用气象条件 (meteorological conditions for transmission line design)

为使输电线路的结构强度和电气性能能够适应正常情况下的气象变化,以保证线路施工安装、运行安全和不浪费线路建设投资,在线路设计时需要收集的沿线的自然环境资料,还应参照附近已有线路的运行经验,选取合适的设计气象条件,作为线路设计的依据。

**气象资料内容及用途** 包括:①历年最高气温,用于计算架空线最大弧垂;②历年最低气温,用于计算架空线应力,检查绝缘子串是否倒拔上扬;③历年平均气温,平均气温时的应力用于架空线防振设计;④历年最大风速及最大风速月的平均气温,用于计算架空线及杆塔强度时的风荷载;⑤地区最多风向及其出现频率,用于防污设计;⑥架空线覆冰厚度,用于计算覆冰时架空线的应力、弧垂以及杆塔的垂直荷载;⑦雷电小时数,用于防雷设计;⑧雨、雪、及雾凇的持续小时数,用于计算线路电晕损失;⑨土壤冻结深度,用于杆塔基础设计。

**气象条件的确定** 在收集到沿线的气象资料后,根据输电线路的电压等级,以及相应的安全可靠要求,用数理统计法分析,选取若干年一遇重现期的数值,并参照附近线路的运行经验,然后确定设计用的气象条件。

气象条件中对线路设计影响较大的是最大风速的取值。中国按现行输电线路设计技术规程的规定,对 35~500kV 输电线路应采用离地面 15~20m 高处 15~30 年一遇的 10min 平均最大风速。设计要求有一定

概率下的最大风速值,但到目前为止,气象科学还不能确定逐年最大风速之间的确切联系。近年来国外对最大风速的概率分布线型进行了不少研究,经各方面推荐的已有多种概率统计线型和各种各样的统计方法,可归纳为两类:①从统计理论上确定年最大风速的概率分布服从于某种线型,然后根据实际的最大风速资料决定该线型的参数;②从经验概率上确定年最大风速的概率分布服从于某种线型,然后根据实际的最大风速资料决定该线型的参数。确定最大风速的概率分布线型及参数,目的是使绘出的理论曲线能与实测绘点吻合得好。目前常用的方法主要有皮尔逊Ⅲ型曲线法、I型极值分布法和尺度变换法三种。I型极值分布法中,因如何应用风速资料去估计常数 $\alpha$ 和极值分布参数 $\mu$ 这两个参数,又有耿贝尔矩法和布莱因有序统计量法两种。

**皮尔逊Ⅲ型曲线法** 根据统计经验,年最大风速的概率分布符合微偏态的皮尔逊Ⅲ型曲线,属指数型分布函数。本法是将历年的年最大风速记录进行时距、测点高度分析换算后,按风速大小顺序排列,计算出最大风速平均值 $\bar{v}$ 和离差系数 $C_v$ 、偏差系数 $C_s$ 等参数,应用《皮尔逊Ⅲ型曲线的离均系数 $\phi$ 值表》确定频率曲线上的相应坐标值,在海森频率纸上绘点描出拟合该最大风速序列的皮尔逊Ⅲ型理论频率曲线。再按照输电线路设计所要求的重现期(或保证率),在该理论曲线上查找须采用的最大设计风速值。从理论上讲,如果对于随机观测量的性质暂不清楚时,该法是一个很好的方法。若资料年代较长,该法得出的理论频率曲线往往与实测的经验绘点吻合得较好;若资料年代不长,则该法的精确度较差。该法是目前水文、气象统计方面最广泛应用的一种方法。

**I型极值分布法** 每年的原始风速记录具有一最大值,许多年最大值的概率分布属于极大值分布。由于原始风速记录的概率分布属指数型分布函数,故其极大值的概率分布属I型极值分布。耿贝尔矩法也是将历年的年最大风速记录进行时距、测点高度分析换算后,按风速大小顺序排列,计算最大风速平均值 $\bar{v}$ 和离差系数 $C_v$ 等参数,应用《耿贝尔曲线的离均系数 $\phi$ 值表》确定累积频率曲线上的相应坐标值,在包伟尔频率纸上绘点描出拟合该最大风速序列的耿贝尔理论累积频率曲线。再按照输电线路设计所要求的重现期(或保证率),在该理论曲线上查找须采用的最大设计风速值。布莱因有序统计量法比较繁复,目前在中国输电线路工程设计中较少采用。

**尺度变换法** 像皮尔逊Ⅲ型曲线法那样,由于引进了参数,而使拟合线具有灵活性。但其中某一参数的选定是从经验点画图来判断确定的,带有计算者的主

观随意性,是有一定缺陷的。尺度变换法的计算也很繁复,优点是其拟合线比皮尔逊Ⅲ型曲线适用范围更广。

在实际应用中,用已有的某一单一线型作为各地区最大风速的出现概率曲线是困难的,只能从各地的实际资料出发,根据不同的情况选用不同的线型。

最大风速的确定除以上三个数理统计法外,常用的还有变通法、平均法及经验频率法三种,均较为粗略简便。

**变通法** 设有 $n$ 年资料,按年份次序排列。自第一年年开始,以每五年为一组。每组按顺序相隔一年,取出每组中的最大值,再取各组最大值的平均值作为采用的最大设计风速值。

**平均法** 设有 $n$ 年资料,按五年为一组分为 $n/5$ 组(取整数),然后取 $n/5$ 个最大数值,再用算术平均法求其平均值作为采用的最大设计风速值。

**经验频率法** 先列出计算公式 $p = m/(n+1)$ , $p$ 为风速出现频率, $m$ 是统计年份内出现的全部风速值由大到小按递减顺序列表的序号(序号即为该风速的 $m$ 值), $n$ 是统计风速的总次数。为求得保证频率 $p$ 时的最大风速,可将 $p$ 和 $n$ 代入上式求得 $m$ , $m$ 所对应的风速即为最大设计风速选用值。

由于影响地面风速的因素很多,如台站周围地面粗糙度的变化,台站和仪器的变迁等都会产生系统误差,造成风速统计不准,所以在选用何种方法上不一定要求非常严格,因为即使要求严格也不一定能达到提高精度的要求。

为了适应设计标准化,中国现行输电线路设计技术规程归纳了各地气象资料,将影响最大的三项即最大风速、覆冰厚度、最低气温作为整理依据,将全国划分为9个典型气象区。如输电线路沿线的气象分析数据与典型气象区接近,一般即采用典型气象区所列数据。

参考书目

谭冠日,严济远,朱瑞兆.应用气候.上海:上海科学技术出版社,1985  
上海数学分会概率论数理统计小组.关于最大风速的数理统计方法.上海:上海科学技术出版社,1959  
(唐在德)

shudian xianlu tongdao

**输电线路通道** (transmission line passage way) 输电线路通过的狭长地带,又称输电线路走廊。输电线路通道宽度有二种不同含义:①指路权宽度,是为满足输电线路建设需要和保证安全运行需要而确定的宽度,在此宽度范围内不允许有危及输电线路安全运行的树木和建筑,在任何时候都保证处于此

宽度范围以外的物体极少可能发生触电的危险。这种通道在土地私有制国家一般需要购置或交付租金。②指输电线路走廊宽度,是从输电线路对周围环境影响出发确定的宽度,要求在此宽度范围内把无线电干扰、电视干扰、可听噪声以及电场强度限制到居民可接受的水平。输电线路走廊宽度一般比路权略大或相等。中国对输电线路通道虽不必购买或租赁,但对通道内的杆塔、拉线等所占用的土地仍须按《国家建设征用土地办法》及其他有关规定征用。为满足输电线路通道要求,往往因拆迁房屋及砍伐树木而使线路建设投资增大,特别在人口稠密地区尤其。为此,必须按输电线路的电压等级,在保证线路安全运行及对周围环境影响不大的原则下,决定线路的最小通道宽度。

决定输电线路的最小通道宽度,一般需考虑的因素:①输电线路正常运行时,导线在最大风偏情况下对通道边缘的物体要保持必需的安全距离,不致发生电气闪络,必要时尚需考虑导线舞动情况;②输电线路在施工及维修时,需要的空间和平面宽度;③输电线路运行时产生的各种现象(如电场、磁场及电晕效应、地电位升高等)对周围环境的不良影响,应限制在许可范围内;④根据中国 SDJ3《架空送电线路设计技术规程》的规定,电压为 330 kV 及以下的输电线路,在某些条件下允许跨越耐火屋顶的建筑物,但不允许跨越易燃材料为屋顶的建筑物;⑤输电线路通过林区时,要求在通道边缘处的树木倾倒时不触及杆塔及导线,且导线在最大风偏时对通道边缘附近处的树冠有必需的安全距离。

为减小通道宽度,在输电线路设计时,一般采取以下措施:

(1)采用多回路塔型。使多回平行的线路尽可能合并到一基塔上。一般将较高电压等级的线路布置在上方,较低电压等级的线路布置在下方。这种塔型在通道困难的国家采用较多,中国则因运行方面维修不便或考虑系统安全,除拥挤地区外,较少采用多于双回路的塔型。

(2)改进塔头设计。将导线由水平布置改为三角形、垂直形(包括伞形、鼓形等)或环形(包括多角形)布置;绝缘子串由垂直悬挂改为 V 形、悬索形或环形(包括多角形)悬挂,使绝缘子串在风情况下不能摇摆;绝缘子改用新型合成绝缘子,以减小绝缘件长度。这种新颖塔型的线路称为紧凑型输电线路。

(3)杆塔合理布置。在多回输电线路共走的线路通道内,杆塔定位时尽可能将不同回路的杆塔布置于同一横列上,使不同回路的线路同步行进,以减小导线摇摆时的安全距离。必要时尚可考虑适当缩小杆塔间的档距。

(唐在德)

shudian xianlu weixian yingxiang

**输电线路危险影响** (danger effects; harmful effects of transmission lines)

输电线路与电信线路接近时,通过感性、容性和阻性耦合,在电信线路上所产生的电压和电流,足以使正在线路上工作的人员发生生命危险,或损坏电信系统的设备和装置,危害电信设备终端用户的安全,均称危险影响。衡量危险影响的电气量为纵电动势、电压和电流。由感性、容性和阻性三种耦合方式产生的危险影响,根据不同具体情况,可单独存在,也可二者或三者兼有。(见输电线路感性耦合影响、输电线路容性耦合影响、输电线路阻性耦合影响)

产生危险影响的线路状态 ①输电线路状态:中性点直接接地系统的三相对称输电线路发生单相接地短路时;中性点不直接接地系统的三相对称输电线路发生两相在不同地点同时接地短路和单相接地故障时;不对称输电线路在正常运行和发生故障时。②电信线路状态:线路两端经高阻抗接地(或两端对地绝缘状态);线路两端经低阻抗接地;线路一端经低阻抗接地,另一端经高阻抗接地。

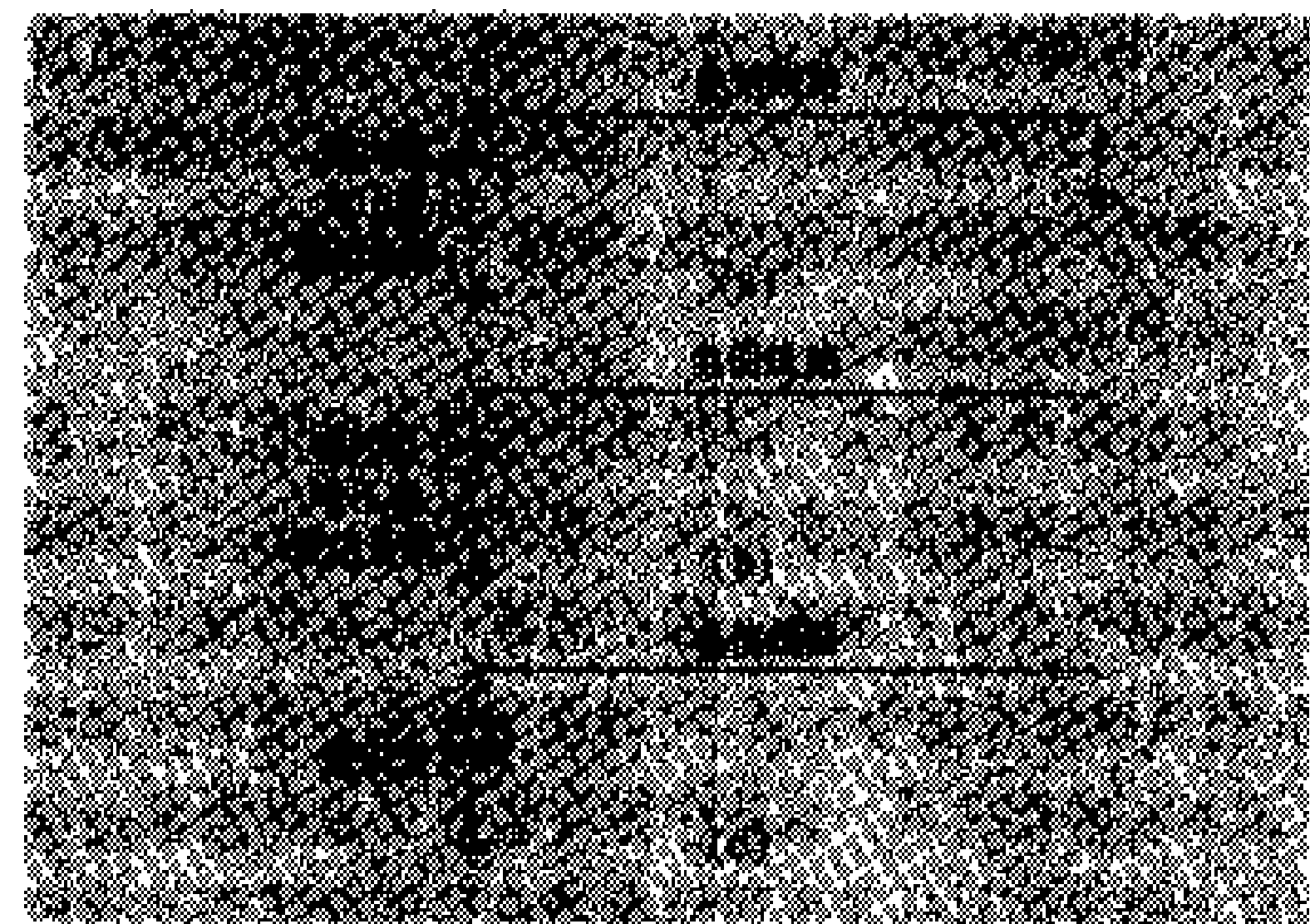
危险影响容许值 除根据是否危及电信工作人员的人身安全和电信设备的安全来确定外,还应考虑是否有预防性的防护措施、保护对象、危险影响存在时间、电信线路类型等因素,同时还与国家当前的技术经济政策有密切关系。目前中国和世界许多国家都是根据自己国家的具体情况同时参考有关国际组织的标准和建议,来制定各自的危险影响容许值,该值还随着科学技术的发展在不断地修订。根据输电线路的运行状态及输电线路与电信线路的耦合方式,通常提出以下的危险影响容许值:①三相对称输电线路在接地故障情况下,由于感性、阻性耦合短时间在电信线路上产生的纵电动势和电压容许值;②不对称输电线路在正常运行或故障情况下,由于感性、阻性耦合长时间在电信线路上产生的纵电动势和电压容许值;③中性点不直接接地系统三相对称输电线路在单相接地故障及不对称输电线路在正常运行情况下,由于容性耦合在电信线路上产生的电流容许值。短时间和长时间在电信线路上产生的纵电动势和电压容许值有区别。架空明线电信线路和电缆电信线路危险影响容许值有区别。

危险影响计算原则 ①对于中性点直接接地系统的三相对称输电线路,当发生单相接地短路故障时,计算由于感性、阻性耦合在明线电信线路和电缆电信线路上产生的纵电动势和电压。②对中性点不直接接地系统的三相对称输电线路,当发生两相在不同地点同时接地短路时,计算由于感性、阻性耦合在电缆电信线路上产生的纵电动势和电压;当发生一相接地故障时,

计算由于容性耦合在明线电信线路和没有金属外皮接地的电缆电信线路中产生的电流。③对于三相不对称的输电线路,在正常运行和故障情况下,计算由于感性、阻性耦合在明线电信线路和电缆电信线路上产生的纵电动势和电压;计算由于容性耦合在明线电信线路和没有金属外皮接地的电缆电信线路上产生的电流。

在计算感性耦合危险影响时,首先应计算纵电动势,如不超过危险影响容许值,就不再计算对地电压,否则还需要计算对地电压是否超过容许值。如在电信线路上同时存在感性和阻性耦合产生的纵电动势和电压时,其总的影响数值取两种影响数值的几何和。

危险影响测量 测量时将电信线路与终端设备断开,在线路的一端用高内阻电压表(或记录器)或电流表进行测量,而另一端接地或对地绝缘。测量接线如图所示。



危险影响测量接线图  
(a) 纵电动势测量; (b) 对地电压测量;  
(c) 感应电流测量

(1)纵电动势测量。可在三相不对称的输电线路正常运行或三相对称、不对称的输电线路故障情况下,在邻近的电信线路上进行测量,其接线图如图(a)所示。在输电线路故障情况下进行测量时,由于故障切除时间极短,电压表无法测量,则采用记录器记录感应纵电动势波形,进行分析计算。

(2)对地电压测量。其测量方法基本与纵电动势的测量方法相同,只是测量时被测电信线路的导线有一端须对地绝缘,其接线图如图(b)所示。测量容性耦合产生的对地电压时,必须在输电线路带电空载情况下进行,以避免因感性耦合产生的对地电压。测量感性耦合产生的对地电压时,须使电信线路对输电线路保持适当距离,以使容性耦合产生的对地电压小到可以忽略不计。

(3)静电感应电流测量。由容性耦合产生的电流又称静电感应电流,可用交流毫安表串接到电信线路的导线上进行测量,其接线图如图(c)所示。

危险影响的防护措施 主要有:①在选择输电线路或电信线路的路径时,保持其间的合理距离,或采用迁移的方法加大输电线路与电信线路之间的距离;②采用屏蔽措施,如输电线路或电信线路架设屏蔽线,输电线路架空地线采用良导体导线,明线电信线路改为有屏蔽的电缆,改善电缆屏蔽性能等;③提高电缆介质强度;④在明线电信线路上装设放电管、中和变压器、隔离变压器、屏蔽变压器;⑤限制输电线路短路电流和采取迅速切断线路故障的措施。在实际工程中须进行具体的技术经济比较,以确定采用何种防护措施。

参考书目  
庞廷智等、电力线路对电信线路的影响和保护。  
北京:水利电力出版社,1986  
(庞廷智)

shudian xianlu weixiu

输电线路维修 (transmission line maintenance) 为消除输电线路的缺陷和异常情况以维持线路设施的正常使用寿命而进行的维护检修工作。输电线路的维修要按有关运行规程规定的要求和周期来进行,一般包括常规维修、带电维修两大类。

常规维修作业 架空输电线路的常规维修包括日常维修(亦称小修)、大修、事故抢修和改进工程。维修工作的项目和内容由定期巡视检测(或预防性试验)的结果确定。(见输电线路巡视检测)

(1)日常维修。通常包括绝缘子定期清扫,并沟线夹紧固螺栓,铁塔刷漆,杆塔螺栓紧固,金属基础防腐处理,木杆杆根削腐涂油,混凝土杆内排水、钢圈除锈,杆塔倾斜扶正以及防护区内伐树砍竹、巡线道桥的修补等。大部分的日常维修作业都不需停电进行。

(2)大修。为恢复输电线路及其附属设备达到原设计的电气或机械性能而进行的检修工作。主要包括:更换或补强杆塔及其部件,更换或补修导线、架空地线并调整其弧垂,为加强绝缘水平而增加绝缘子或更换防污型绝缘子,改善接地装置,加固杆塔基础,更换或增设导线及地线防震装置,处理不合格的交叉跨越线段以及根据防汛等反事故措施要求调整杆塔位置等。

(3)事故抢修。对由于自然灾害(如地震、洪水、冰害、暴风雨、雷击等)及外力破坏(如采石放炮,杆塔器材被窃等)所造成的倒塔、断线、绝缘子整串闪络及金具脱落等停电事故所进行的计划外抢修工作。抢修工作通常由组织好的事故抢修队伍在接受抢修命令后限期完成。

(4)改进工程。为了提高供电能力或改善系统运行方式而进行的改进工作。改进工程大体包括:更换大容量导线,升高电压,增建或改建部分线路等。改进工程

一般由线路工区的专职检修班负责，大型改进工程也可由生产单位委托专业施工公司完成。

**带电维修作业** 为减少因检修造成用户停电，从20世纪50年代开始，中国开展了带电维修工作。带电作业方法有间接作业法（亦称地电位法）、等电位作业法和中间电位法三种，项目有带电水冲洗及更换绝缘子，绝缘子等值附盐密度测试，补修导线，接入或拆除空载线段，调整导线弧垂，更换腐蚀架空地线等。近年来，一些供电单位已开展带电加高、更换杆塔，更换导线等复杂项目。（见输电线路带电作业）

（方平安）

shudian xianlu wuhui dengji

**输电线路污秽等级** (pollution classes of transmission line) 见输电线路绝缘设计。

shudian xianlu wuxiandian ganrao

**输电线路无线电干扰** (radio interference of transmission lines) 输电线路导线因电晕放电产生的高频电磁场对无线电广播、通信的干扰。高压输电线路导线表面的电场强度如超过电晕起始电场强度会造成该处局部空气游离形成电晕放电。由电晕放电形成的电流脉冲经电晕源注入导线，沿导线传播并向四周发射高频电磁波。导线在交流正负半波时分别形成正、负极性电晕电流脉冲。正极性电流脉冲幅值较大，且各脉冲峰值参差不齐，波头和持续时间较长。负极性电流脉冲幅值较小，且各脉冲峰值基本一样，波头和持续时间较正极性短。输电线路电晕对无线电的干扰主要是来自正极性电晕电流脉冲。

**输电线路无线电干扰特性的变化** 输电线路对无线电的干扰，随着离开线路横向距离的增加而迅速衰减，并具有特定的规律，一般在横向距离输电线路200m时，干扰已衰减到背景干扰水平以下。

**输电线路刚投入运行时**，由于制造和施工过程中造成的导线表面缺陷，使无线电干扰水平较高。随着运行时间的增长，干扰水平会逐渐降低，经半年或更长一些时间后达到稳定。

**输电线路的无线电干扰受天气条件和季节的影响** 很大，雨天时的干扰水平约比好天气时大17~24dB。运行中灰尘、昆虫和植物等微粒附着在导线上，都会成为导线的干扰源。季节不同，附着的沉积物种类和数量不同，相应的干扰水平也会有明显的变化。

**输电线路无线电干扰影响的评价标准** 输电线路产生的无线电干扰有特定的频谱特性，在频率为100kHz附近的干扰值最大，随着频率增加干扰值很快衰减（频率为10MHz的干扰值比1MHz的干扰值约低

30~40dB）。由于线路电晕产生的干扰频段正好位于调幅广播频带（535~1605kHz）范围内，因此，一般讲输电线路的无线电干扰实际上是指对调幅广播的干扰。评价输电线路电晕是否会对附近居民收听广播有干扰时，除应知道输电线路本身产生的干扰电平外，还应知道收听的信号电平和周围环境的背景干扰电平。一般是用信噪比来评价收听质量的。信噪比是指用分贝（1μV/m的电场强度为零分贝）表示的信号电平与综合干扰电平的差值。达到良好收听效果的允许信噪比为24dB。由于评定收听质量带有主观性，不同的收听者在同一地点收听同一信号，会得出不同的意见，因此需要通过大量的统计资料才能确定。

**输电线路无线电干扰电平的计算** 输电线路的无线电干扰电平可以准确的计算，目前通用的计算方法有比较法和产生函数法两种。

(1) 比较法。20世纪60~70年代国际上普遍用来计算待建线路无线电干扰电平的方法。该方法是基于用试验得到的经验公式进行计算的。具体做法是在线路试验基地，先选定一种导线结构，包括导线根数和导线直径作为基准线路，在规定的导线表面工作场强、测试位置和测试频率下，测出它的干扰电平作为基准，然后分别改变导线表面工作场强、导线根数、导线直径、测试位置和测试频率，测量改变参数后相应的干扰值的变化，从而得出相应的关系表达式。据此，任意导线结构的无线电干扰值的计算公式为

$$N = N_1 + \Delta N_E + \Delta N_d + \Delta N_n + \Delta N_D + \Delta N_f$$

式中  $N$  和  $N_1$  分别表示待求线路和基准线路的干扰值； $\Delta N_E$ 、 $\Delta N_d$ 、 $\Delta N_n$ 、 $\Delta N_D$  和  $\Delta N_f$  分别表示单独由于待求线路导线表面工作场强、子导线直径、子导线根数、测试位置、测试频率与基准线路不同所引起的干扰值改变量。

(2) 产生函数法。20世纪70年代法国和美国先后提出的方法。该方法是根据电晕放电仅是导线周围空气局部游离这一特点，设法使导线周围的电场和实际运行线路一致，以在实验室内重现实际线路的电晕放电。具体做法是用电晕试验笼来代替试验线段进行线路无线电干扰的研究。通过测量笼内导线电晕时的干扰电流，理论分析推导出导线电晕时表征空间电荷量及运动特性的特殊函数，称为产生函数。基于用电晕试验笼得到的大量试验数据，从而可得到产生函数与导线表面场强、子导线直径、子导线根数等参数有关的一系列曲线和相应的关系表达式。计算实际线路的无线电干扰值时，可根据这些曲线或表达式，求出该线路的产生函数，由此推导出干扰电流和相应的电荷，从而计算出空间任意点的无线电电场的场强。

参见彩图插页第7页22图。



## 参考书目

[美]安德生等著. 345 千伏及以上超高压输电线路设计参考手册. 电力工业部武汉高压研究所译. 北京: 电力工业出版社, 1981

(Anderson J G. Transmission Line Reference Book 345 kV and above. Electric Power Research Institute, 1975)

Working Group 36.01. Interferences produced by Corona Effect of Electric Systems. CIGRE, 1974

(邵方殷)

shudian xianlu xunshi jiance

**输电线路巡视检测** (inspection and survey of transmission line)

工作人员用眼睛或用望远镜以及其他工具和仪器对输电线路的各部件进行观察、检查和测量。目的是为了掌握线路的运行状况, 及时发现设备缺陷和威胁线路安全运行的情况, 并为线路检修提供项目和内容。

**输电线路巡视检测分类** 输电线路的巡视检测按其工作性质和任务以及规定的时间不同, 一般分为定期巡视、特殊巡视、夜间巡视和故障巡视。

**定期巡视** 目的在于经常掌握线路各部件运行状况及沿线环境情况。定期巡视一般是徒步用目测、仪测进行, 也可利用直升飞机借助红外热像仪、可见光摄像机等设备进行。对于一些在地面难以观察清楚的部件, 还要定期登上杆塔检查。

**特殊巡视** 在气候剧烈变化(如大雾、狂风、暴雨、导线覆冰等)、自然灾害(如地震、河水泛滥、森林起火等)、线路过负荷和其他特殊情况或对线路运行可靠性有特殊要求时, 对线路全线、某几段或某些部件进行的巡视。目的是及时发现线路的异常现象。

**夜间巡视** 为了检查导线连接器发热情况或绝缘子污秽放电情况。

**故障巡视** 为了查明线路发生故障接地点、跳闸的原因, 找出故障点并查明故障情况。

**巡视检测的主要内容** 包括沿线环境情况、杆塔和基础情况、导线和架空地线情况、绝缘子情况、防雷及接地装置情况、附件及其他设备情况等六个方面。

**沿线环境情况** 建筑施工, 超高车辆、机械的通过和停留, 树木、竹林的生长, 电力或电信线路、管道、索道、电缆等的架设或敷设, 道路、铁路的修建, 土方挖掘施工爆破, 采石爆破, 污染源及环境污染等一切可能影响线路安全运行的情况。

**杆塔和基础情况** 杆塔本体倾斜、腐蚀、变形、损伤、裂纹、缺件、螺栓类松弛、脱落, 拉线松弛、锈蚀、损伤、缺件, 杆塔基础的下沉、露出、损伤等情况。

**导线和架空地线情况** 导线和架空地线的腐蚀、

断股、弧垂不一致, 连接器发热等情况。

**绝缘子情况** 绝缘子污秽、瓷质裂缝、破碎, 钢脚及钢帽锈蚀、销子脱落, 绝缘子串偏斜等情况。绝缘子劣化的检测需用专用工具进行。

**防雷及接地装置情况** 避雷器、保护间隙及其他设备的连接固定、接地引下线、接地装置间的连接固定及锈蚀等情况。

**附件及其他设备情况** 间隔棒、防振锤、线夹等附件的锈蚀、滑动, 螺栓类的松弛、损伤, 预绞丝或阻尼线滑动、变形, 防振锤滑移离位、钢丝断股, 均压环锈蚀及各种金具的螺栓松动、脱落, 销子脱落等情况。

将通过巡视检测掌握的设备运行状况与线路运行标准对照, 构成缺陷者采用更换、修补等方法进行处理, 或在线路检修时进行处理。

**巡视检测的主要方法** 包括架空线弧垂和限距测量、杆塔倾斜和挠曲测量、导线连接器测试、绝缘子测量、绝缘子等值附盐密度测量、导线和架空地线振动现场测量、输电线路接地电阻测量等。

**架空线弧垂和限距测量** 导线长期运行后因塑蠕伸长而使弧垂增大, 线路下方或附近新出现建筑物、其他设施以及种植树、竹, 因故杆塔移位以及杆塔改造而使呼称高变化, 因故调整绝缘子串长度等情况发生时, 应及时测量导线对地或对其他物体的距离是否符合规定的要求, 增大后的导线弧垂是否在允许偏差范围之内。测量可用经纬仪进行, 也可用绝缘绳进行。

**杆塔倾斜和挠曲测量** 杆塔由于基础发生不均匀下沉使塔顶部偏离正常位置称为杆塔倾斜。杆塔由于机械荷载作用, 其头部或身部偏离正常位置、发生弯曲

变形, 称为杆塔挠曲。杆塔倾斜或挠曲, 一般用重锤法、弦线法或经纬仪观测法测量。重锤法是在杆塔顶部中心位置上用绝缘细绳吊一重锤至地面, 量出锤尖触地点至杆塔中心点的距离即为该杆塔顶部倾斜值。弦线法是用以测量混凝土杆中部的挠曲值, 如图 1 所示, 在挠曲面内侧杆面拉上弦线, 然后用钢尺量出最大弯曲值即为杆身之最大挠度。

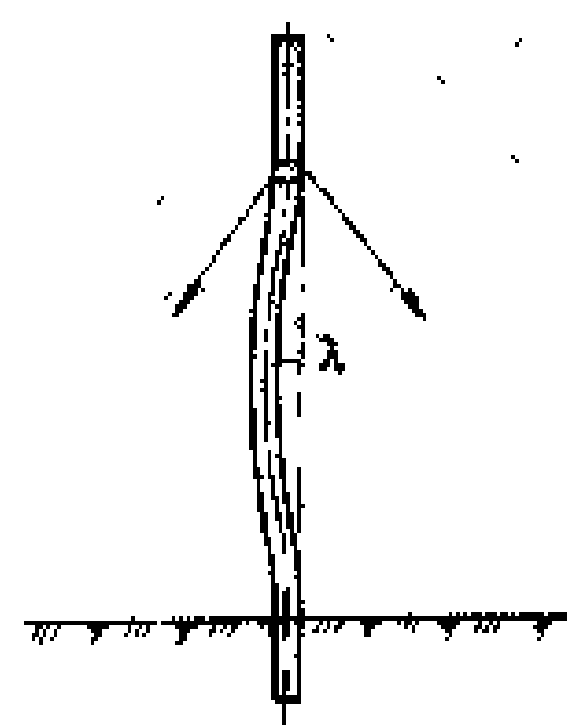


图 1 用弦线法测量混凝土杆挠曲值

**导线连接器测试** 导线连接器通过负荷电流和短路电流的能力必须与导线相同。如果连接器施工时工艺不当, 导线与连接器接触处表面清洁处理不良或紧密程度不够, 致使导线与连接器之间接触电阻增大, 尤其是不同金属的连接还会发生电化学腐蚀, 更使接触电阻增大, 这样当电流通过时, 连接器就会发热产生高温, 严重时使连接器烧红甚至烧断。连接器的测试一般



在线路带电情况下进行。带电测试连接器的方法,目前常用的是电压降法、触蜡试验法和红外测温仪法三种。

(1)电压降法。一种方式是用特制的检测杆来进行测试,如图2所示,检测杆上端有一根横的电木管,管的两端均有接触钩,还有一只带整流器的直流毫伏表。把接触钩压在运行的导线上或连接器两端时,毫伏表就指示两钩间导线或连接器内的电压降,这样就求得连接器和导线电阻的比值。有关规程规定该电阻比值应小于或等于1。若该电阻比值大于1.2小于2.0时,应加强监视和检测;若大于2.0时应即作处理。另一种方式是用特制的试验器来进行测试,如图3所示,翻斗滑车挂在导线上或连接器上,用绝缘绳把试验器拽起,贴到导线上,用望远镜观察试验器上毫伏表的读数。

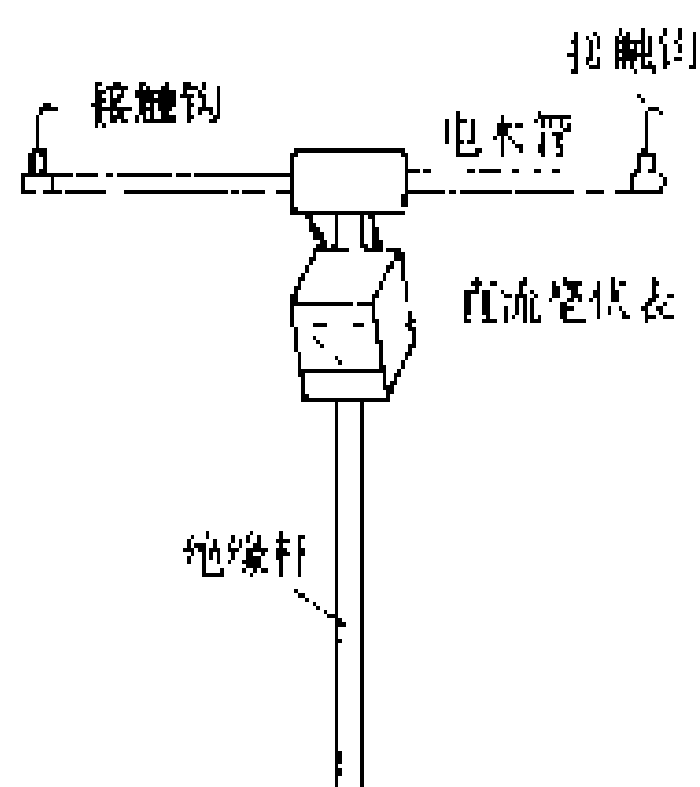


图2 用检测杆测试导线连接器

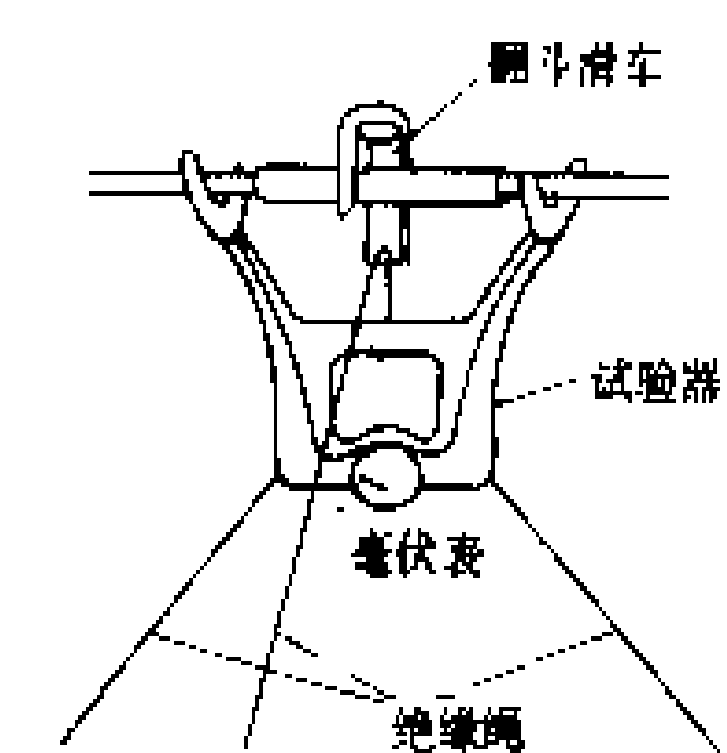


图3 用试验器测试导线连接器

(2)触蜡试验法。在石蜡中掺入其他成分,可以使它有不同融化温度,制成的蜡笔、蜡片一般有融化温度为60~65℃、70~75℃、85℃及以上三种。试验时,把蜡笔或蜡片绑在绝缘杆头部,触到被测连接器上,看蜡笔或蜡片是否融化及融化程度如何,以判断连接器运行状况是否良好。触蜡试验一般用来检测耐张压接管、跳线连板、并沟线夹等。

(3)红外测温仪法。任何物体只要它的温度高于绝对零度(-273℃)都能发射、吸收和反射肉眼看不见的电磁波,物体温度愈高辐射出的红外线能量愈大。红外测温仪的原理是通过高灵敏度的感温元件接收发热物体辐射出来的红外线能量,使之变为电能,经电子线路放大后,由仪表指示出温度读数,从而判断物体的运行状况。红外测温仪由光路系统和电路系统两部分组成,光路系统用以瞄准目标,并将目标辐射的红外线能量接收进来,反射到感温元件上;电路系统将感温元件上由热能转换为电能后的电信号放大,由仪表指示出被测物体温度。用红外测温仪可以直接测得连接器温度,但一般都在输电线路负荷电流较大时进行。

绝缘子测量 盘形悬式绝缘子由钢帽、瓷体和钢脚三部分组成,理论上可将它看成一个电容器,钢帽和钢脚分别为两个极,瓷体是介质。整串绝缘子包含有二部分电容:①每只绝缘子的电容及其串联成绝缘子串

的电容;②绝缘子上的金属部分与杆塔形成的电容;③绝缘子上的金属部分与导线形成的电容。在这三部分电容的影响下,沿绝缘子串电压分布是不均匀的。计算和实测都表明,从导线算起的第一片绝缘子承受的电压最大,依次向横担方向递减,到接近横担时,绝缘子上承受的电压又逐渐增大,但比导线侧的要小许多。在超高压输电线路的绝缘子串下端装有均压环,这是为了增加绝缘子对导线的电容,以改善电压分布,降低靠近导线的绝缘子所承受的电压。

绝缘子串中如果每片绝缘子都是良好的,则在运行中每片上都有一定的电压分布。如果某片绝缘子因劣化而降低或丧失绝缘,则在该片上的电压分布值就会降低或呈零值。测量时,将测得的每片绝缘子的电压分布值与标准值进行比较,当电压分布低于标准值的50%时即认为“不良”或是“零值”。

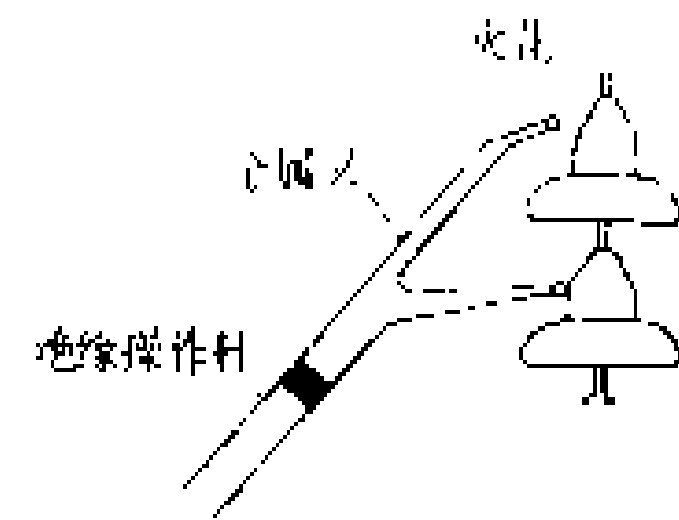


图4 火花间隙式检测器

盘形悬式绝缘子的电压分布检测器常用的有火花间隙式和可调火花间隙式两种。①火花间隙式:如图4所示,它是一个分叉的金属头装在一根绝缘操作杆上,测量时将叉的一端与被测绝缘子的下一只绝缘子钢帽接触,而另一端逐渐靠近被测绝缘子的钢帽。如果该绝缘子完好,则在检测器另一端距该绝缘子钢帽一定的

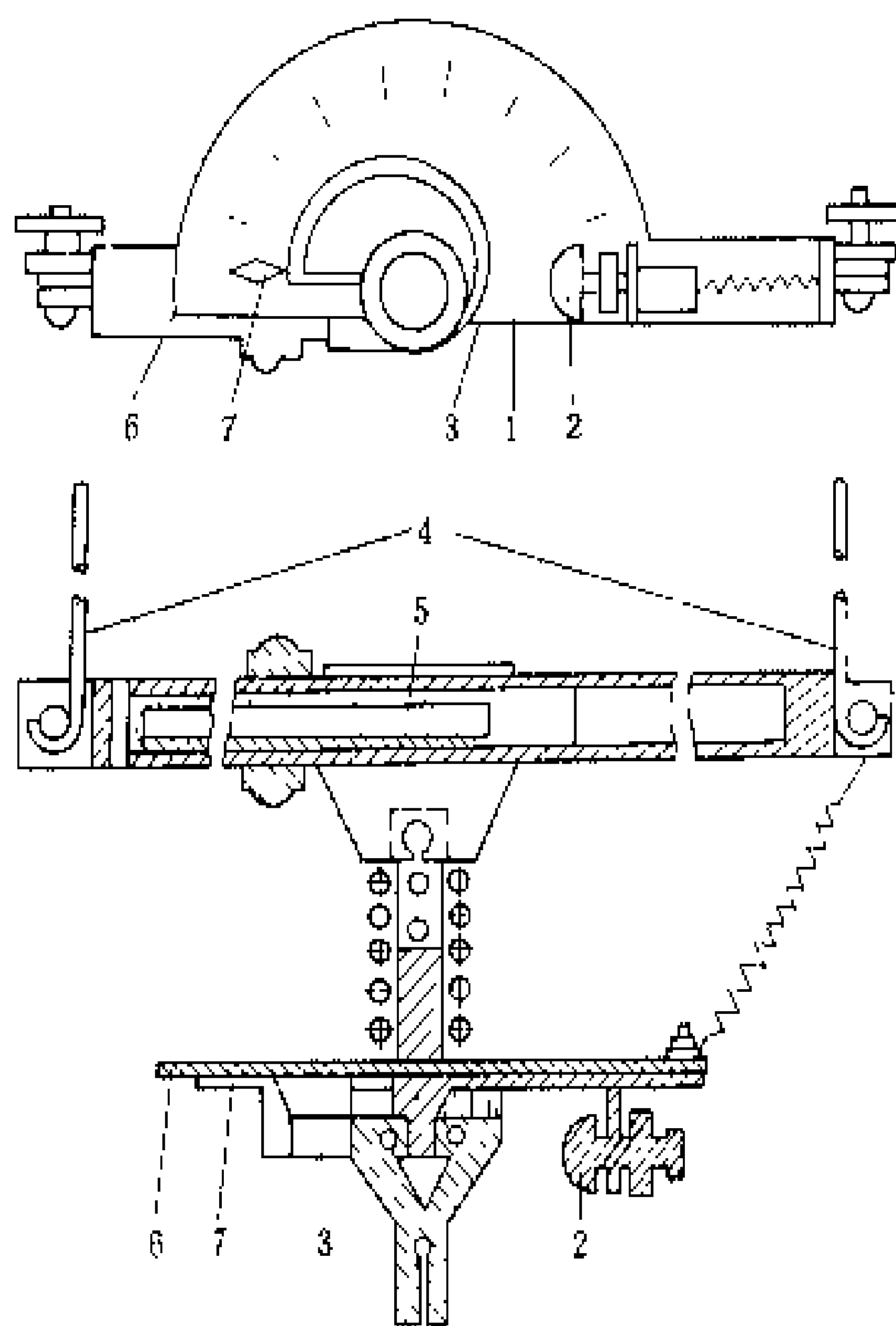


图5 可调火花间隙式检测器

1—火花间隙;2—固定电极;3—可动弧形电极;4—探针或探针叉;5—串联电容器;6—电压刻度盘;7—指针

间隙时,就可能出现火花放电;如果该绝缘子有缺陷,则只有在金属叉相当靠近钢帽时,才会产生火花放电。若金属叉已和钢帽接触也不产生火花,则表明该绝缘子为零值绝缘子。由此,可根据火花声音大小来判断绝缘子的好坏。用火花间隙式检测器测量绝缘子的方法是较粗略的。②可调火花间隙式:如图 5 所示,它是由一个串有电容的可调火花间隙装在绝缘操作杆上组成,测量时将金属叉卡在被测绝缘子钢帽和钢脚上,旋转操作杆以改变火花间隙距离,使其放电,其临界放电电压即为该绝缘子上的分布电压,可从刻度盘上读出。如可调间隙完全短接时仍不放电,刻度盘上读数为零,则表明该绝缘子为零值绝缘子。

能在盘形悬式绝缘子串上自动行进并逐个测定绝缘子分布电压或绝缘电阻的测试仪已有应用。

绝缘子等值附盐密度测量 见中国原水利电力部 1983 年颁发的《高压架空线路和发变电所瓷外绝缘污秽分级标准》及其附录。(见输电线路绝缘设计)

(王之珮)

shudian xianlu zuxing ouhe yingxiang

输电线路阻性耦合影响 (resistance coupling effects of transmission lines)

对称输电线路在接地故障情况下或不对称输电线路在正常运

行情况下,入地电流在接地点周围形成高电位。如地上地下各种金属管线或电信设备的接地极处在此高电位或入地电流的作用区域内,则在这些管线或设备上产生电压。该电压除基波外,还包含各种谐波成分,这是通过接地电极的电阻耦合产生的,如图所示。这种耦合作用在金属管线或电信设备上产生的影响,称为阻性耦合影响,又称地电位影响或大地电流影响。

输电线路对架空明线电信线路的阻性耦合影响主要有如图 (a)、(b)、(c) 所示的三种情况。

(1) 如图 (a) 所示情况,由于阻性耦合,输电线路在接地的明线电信线路上产生的电压为

$$U_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{D_{AM}} - \frac{1}{D_{BM}} - \frac{1}{D_{AN}} + \frac{1}{D_{BN}} \right), V \quad (1)$$

式中  $I$  为输电线路入地电流, A;  $\rho$  为大地电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $D_{AM}$ 、 $D_{BM}$ 、 $D_{AN}$ 、 $D_{BN}$  分别为两线路点状接地电极间的距离, m。

输电线路与明线电信线路接地电极间的互电阻(耦合电阻)为

$$R = \frac{U_{MN}}{I}$$
$$= \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{D_{AM}} - \frac{1}{D_{BM}} - \frac{1}{D_{AN}} + \frac{1}{D_{BN}} \right), \Omega \quad (2)$$

(2) 如图 (b) 所示情况,明线电信线路的一个接地电极处在输电线路入地电流作用区域内,则

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{D_{AM}} - \frac{1}{D_{BM}} \right), V \quad (3)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{D_{AM}} - \frac{1}{D_{BM}} \right), \Omega \quad (4)$$

(3) 如图 (c) 所示情况,明线电信线路的一个接地电极与输电线路的一个接地电极靠近,则

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \times \frac{1}{D_{AM}}, V \quad (5)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{1}{D_{AM}}, \Omega \quad (6)$$

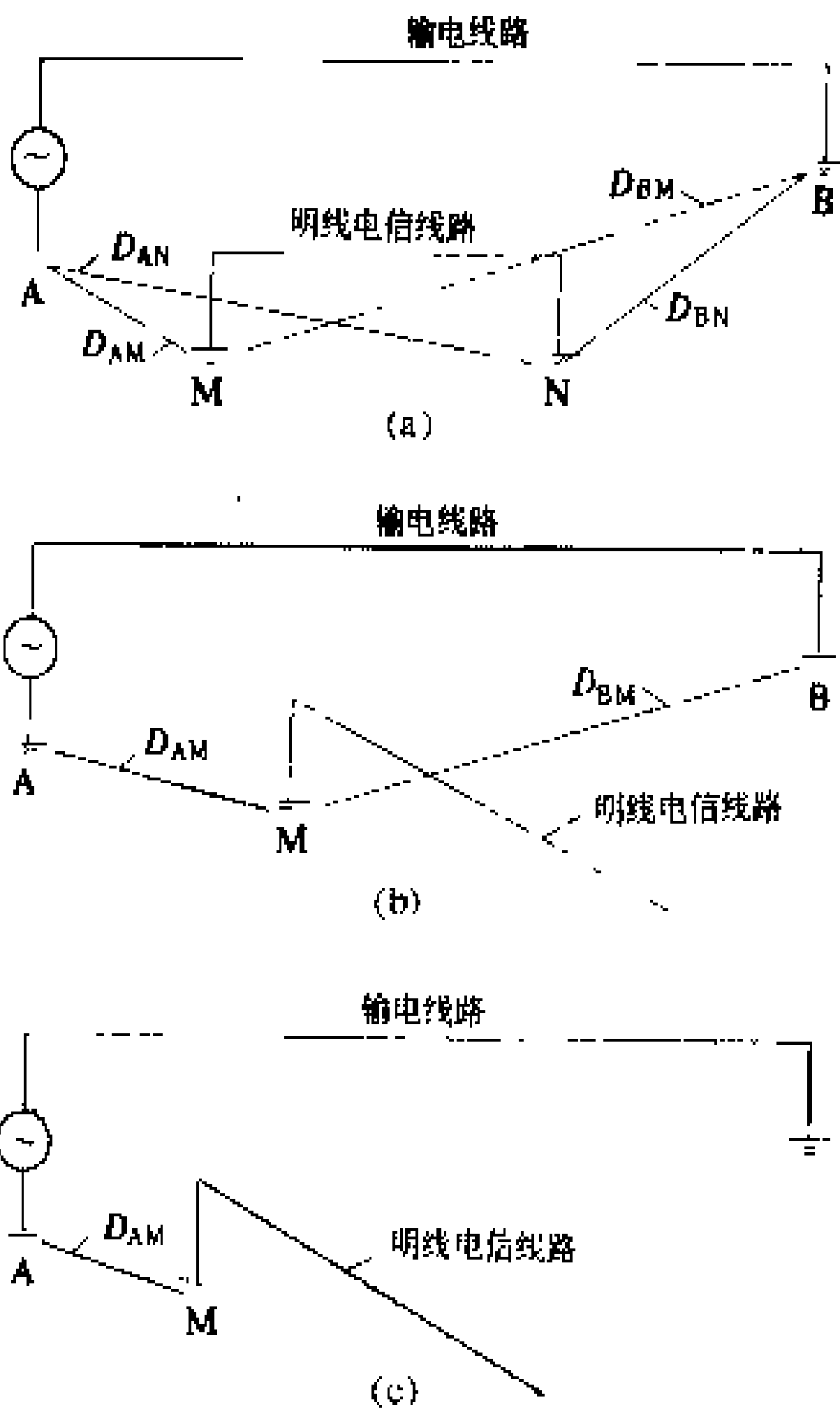
输电线路对地下电缆电信线路(金属管线)的影响由于阻性耦合,在正对电流入地点的地下电缆外皮(金属管线)上产生的最大电压(对无限远处的零电位点)及其间的耦合电阻为

$$U = \frac{\rho \gamma I}{2\pi} \varphi(0, v), V \quad (7)$$

$$R = \frac{\rho \gamma}{2\pi} \varphi(0, v), \Omega \quad (8)$$

式中函数  $\varphi(0, v) = \frac{\pi}{2} [H_0(v) - Y_0(v)]$ , 其中  $H_0(v)$  为零阶斯特罗夫函数,  $Y_0(v)$  为零阶赖曼函数;  $\gamma$  为电缆外皮(金属管线)-大地回路的传播常数,  $1/m$ 。

输电线路对电信局(站)的影响 由于阻性耦合,在电信局(站)接地的机架或设备外壳上产生的高电位



输电线路与明线电信线路阻性耦合示意图

(a) 明线电信线路两个接地电极处在输电线路入地电流作用区域内; (b) 明线电信线路一个接地电极处在输电线路入地电流作用区域内; (c) 明线电信线路一个接地电极与输电线路一个接地电极靠近

及其间的耦合电阻为

(1) 如输电线路接地电极为点状或半球状

$$U = \frac{\rho I}{2\pi D}, V \quad (9)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi D}, \Omega \quad (10)$$

(2) 如输电线路接地电极为圆板状

$$U \approx \frac{\rho I}{2\pi r} \arcsin\left(\frac{r}{D}\right) \approx \frac{\rho I}{2\pi D}, V \quad (11)$$

$$R \approx \frac{\rho}{2\pi r} \arcsin\left(\frac{r}{D}\right) \approx \frac{\rho}{2\pi D}, \Omega \quad (12)$$

式中  $D$  为输电线路接地电极与电信局(站)接地点间的距离, m;  $r$  为圆板接地电极的半径, m。

阳性耦合影响取决于输电线路入地电流大小和耦合电阻的数值, 而耦合电阻与接地电极周围的大地结构、大地电阻率、接地电极的几何形状、接地方式、接地电极间的距离等因素有关。式(1)~式(12)是按单一电极在均质大地情况下考虑的。对于多重复杂的接地电极, 或在非均质大地情况下, 耦合电阻的计算比较复杂, 要精确计算十分困难。

见输电线路危险影响。

#### 参考书目

庞廷智等, 电力线路对电信线路的影响和保护, 北京: 水利电力出版社, 1986

高攸纲, 感性耦合与阻性耦合, 北京: 人民邮电出版社, 1979

(庞廷智)

shupedian

**输配电** (power transmission and distribution)

电力系统中发电厂(生产者)与电力用户(消费者)之间的输送电能与分配电能的环节, 是输电与配电的总称。输电是从发电厂或发电中心向消费电能地区输送大量电力的主干渠道或不同电网之间互送大量电力的联网渠道。配电是在消费电能地区之内将电力分配至用户的分配手段, 并直接为用户服务。

输电设施包括输电线路、变电所、开关站等。配电设施包括配电线路、配电变电所、配电变压器等。儿组输电工程设施组成网络结构, 形成输电网。输电主干线(Trunk Transmission Lines)及其送端与受端的同一电压等级的电网, 包括途中连接的同级电压电网, 均属于输电网范围。从输电网到用户之间, 都属于配电网范围。输电网与配电网, 有时也分别称为输电系统与配电系统。输电系统与配电系统再加上发电厂和用电设备总称为电力系统。输电网与配电网均不包括发电厂, 但中国习惯, 地区电网是一种泛称, 例如华北电网、东北电网、华东电网等等, 均包括发电厂的全部设施在内。

**输电与配电的形成** 电力工业出现的雏形, 是以小型发电厂孤立建在电力消费中心, 用发电机电压的若干直配线直接给用户送电, 它是发电与配电的简单组合。后来发展了较高电压, 采取了升压措施向较远地方以辐射形短线输送电力, 但其容量较小, 还属于配电性质。

输电技术是伴随着城市的发展和大工业的出现, 以及发电厂远离用电负荷中心而兴起的。现代大型工业倾向于建在原材料基地, 市民用电随生活水平提高而扩大, 而现代大中型发电厂倾向于建在能源基地(如煤炭基地、流域上的水力资源所在地), 不可避免地造成了电源远离电能消费中心的局面, 使得输电技术越来越重要。

输电与配电的容量和距离逐步扩大, 促使输电与配电所使用的电压不断提高, 线路技术不断进步, 电器制造技术不断创新, 从而使输电网与配电网迅速发展起来, 而且逐步形成了电网的联合。输电电压现已发展到 1150kV。另一方面, 配电电压沿用了过去的输电电压, 把过去的输电网降为配电网使用, 过去的输电电压成为配电性质, 故称之为次输电电压, 这是总的趋势。(见输配电简史)

直流供电方式, 早期是以发电机电压直配线方式出现的。由于没有简便高效的直流变压设备, 早期的直流供电方式不久即被交流输配电所代替。经历了很长一段时间, 直至现代高压直流输电兴起, 直流输电才成为广泛的交流输电网中的一个重要的特殊环节, 但还未形成直流网络。直流输电在交流输电网中起着许多重要的作用, 但也存在若干局限性。(见直流输电与交流输电)

**输电与配电的电压** 输电与配电的划分, 主要是按照它们各自的性质, 并依照它们在电力系统中某一发展阶段的作用和功能来区分。从电压等级上, 也能够表示其输电与配电的功能和作用。

欧美国家早期曾把 10kV 等称为一次配电电压, 把 380/220V 称为二次配电电压, 将超过 10kV 的电压称为输电电压。后期由于电力系统不断发展壮大, 输配电所采用的电压不断提高, 便不得不把 110、63、35kV 等称为次级输电电压, 但在性质和功能上又列入配电范围, 主要是因为在此称谓上积重难返。对于输配电的电压, 欧洲国家倾向于划分为输电电压、次输电电压与配电电压三类; 美洲国家则划分为输电电压与配电电压两类, 而将次输电电压按其功能包括在配电范围之内; 中国也是划分为输电电压与配电电压两类, 但不使用次输电电压的名称。

**配电电压的分级** 中国对配电电压的分级作出了明确的规定。原能源部与建设部联合颁发的《城市电力

网规划设计导则》规定：

高压配电电压	35~110 kV
中压配电电压	10 kV
低压配电电压	380/220 V

某些地区在 220 kV 输电网尚未出现前，可将 110kV 作为输电电压。

按照这一规定，即以高、中、低压配电，分别代替以往习惯采用的次输电、一次配电与二次配电。

**输电电压的分级** 对于超高压（EHV）与特高压（UHV）的划分等级方法，在现阶段尚无统一的国际规定，各国习惯颇不一致。美国国家标准（ANSI C92.2—1981）中规定：超高压为高于 242 kV，但低于 1000 kV 的最高系统电压；特高压为等于或高于 1000 kV 的最高系统电压。

中国习惯是按照输电技术特点划分输电电压等级为三段，与美国标准类似：

特高压输电电压（UHV）	1000 kV 及以上
超高压输电电压（EHV）	330、500、750 kV
高压输电电压（HV）	220 kV

超高压输电有三个特点：①电晕损耗和无线电干扰问题比较突出，需要采用分裂导线与扩径导线以及防晕金具，通常还需采取均压措施，以改善绝缘子串上的电压分布，减少电晕损耗；②操作过电压成为决定绝缘水平的控制因素；③输电线路的充电功率大，需要设置并联电抗器。

特高压输电也有三个特点：①所需要的空气间隙长度成为突出问题，因空气间隙在操作波和工频电压作用下的击穿特性呈饱和趋势；②对环境影响更为突出，如对无线电及电视的干扰、可听噪声以及强电场对生理和心理的影响等；③其输电线路的充电功率更大，必须设置并联电抗器，或同时采用良导体作架空地线，以降低工频过电压。

中国的输电电压，近年来提高得较快。西北电力系统已建立起 330kV 输电网，其余几个大区电网和省网均已建立或即将建立 500kV 输电网。华中与华东电力系统之间的 ±500kV 葛洲坝—上海直流输电工程已经建成。预计 21 世纪初期，中国将开展 1000kV 级特高压输电的研究、规划与设计。

选用输电电压与配电电压的基本原则是：①依照国家标准（中国标准为 GB156《标准电压》）；②要适应本系统的电压系列；③有利于与相邻电力系统的联网；④力求简化降压层次，避免繁复。（见输配电电压等级）

**输电与配电的功能** 城市在不断发展，市区内又不能建大电厂。这种电源与用电地区的分离，使得输电成为必要手段。输电与配电的功能也有所扩展。

**输电的功能** 输电可以是大容量输送电力，或远距离大容量输送电力。具体的应用方式有：

（1）从远方水电站输送大容量电力到电能消费的集中地区，尽管距离可能很远，但从开发水电资源的整体工程经济分析看，常常是经济的。

（2）从煤炭基地的矿口火力发电厂向远方负荷集中地区大容量送电，以减轻煤炭长途运输，并为煤电联营创造条件。

（3）从缺少能源的大工业地区建立的核能发电站，向主网输送大容量电力，距离不是很远，但在输电网中起很大作用，特别是处于电力系统的末端。

（4）以输电实现两个电力系统互联，可以取得显著的联网效益：①富能地区向缺能地区输电，多种能源的协作，特别是水电与火电以及核电的互相调剂与经济调度；②不同地区、不同负荷特性的错峰效益，特别是时差、季节差、峰谷差以及跨不同流域水电的补偿调节等等；③可以实现本系统内互为备用，使总装机容量减少，节省投资，有利于采用较大机组，提高效率；④可以提高供电的安全可靠性以及电能质量；⑤有利于选择最优的能源调度方式和电力调度方式，以提高整体的效率，降低损耗；⑥可以实现规模效益。

以输电实现联网的功能，从宏观上说，输电也是一种专用的能源输送渠道，它和输油管道、输气管道、输煤管道一样，都可以代替铁路、河运、海运等普通运输系统输送能源。

**配电的功能** 在电力系统中接受发电基地或输电网的大量电力，分配到不同的负荷区直至不同的用户，从而完成电能的最终消费。配电的具体功能是按照不同的需要以不同的方式实现的：①分配电力到城市、郊区、乡镇和农村；②分配和供给农业、工业、商业、居民住宅以及特殊需要的用电。

**输配电设施的名称** 线路设施的名称，习惯上是按输电电压或配电电压来称呼，比较简明清晰。例如 500kV 输电线路、10kV 配电线路等。变电所的名称，中国习惯是以变电所的最高一级电压来称呼。例如 220/110/10kV 变电所称为 220kV 变电所，属于输电变电所性质，并属于 220kV 输电网范围之内。同一原则，从超高压降到高压输电电压，例如 500/220/10kV 变电所称为 500kV 变电所，仍属于输电变电所，是 500kV 输电网的一部分。但如按电网的电气连接关系划分，则 220kV 输电网还应包括 500kV 变电所的 220kV 部分。

**输配电的现状** 输电与配电工程设施及其设备的技术水平，表现在许多方面，其中最主要的综合标志就是所采用的最高电压等级。

**国外输配电现状** 从最高电压等级分析，国外已

建成 400、500、750kV 超高压输电网，如欧洲国家及美国、苏联、加拿大等国。世界第一条 1150kV 特高压输电工程，已于 1985 年在苏联建成。

**中国输配电现状** 中国在 1981 年建成第一条 500kV 平顶山—武昌输电线路，全长 595km。在 20 世纪 80 年代，中国的华中、东北、华北、华东电网以及山东省网，相继建设起 500kV 超高压输电线路。至此，中国已经形成了以 500kV 电力系统为主的发展局面。中国第一条大容量远距离±500kV 超高压直流输电工程已于 1989 年建成，它连接华中和华东两大电力系统，输电线路全长 1080km，输送功率单极 600MW，双极 1200MW，是中国首次在两大区电力系统之间建立起来的比较强大的直流输电线路。

见输配电简史、输配电技术展望、远距离输电。  
(徐博文)

shupeidian dianci yu huanjing yingxiang  
**输配电电磁与环境影响** (electromagnetic and environment effect in power transmission and distribution) 电力生产、输送和分配过程中所产生的电磁场对周围环境的影响及其防护。交流高压输电线路附近和变电所内会产生工频电场、工频磁场以及因电晕放电而产生的高频电磁场。伴随电晕放电还会产生可听噪声和少量臭氧。在直流超高压输电线下及其附近的空间还会出现大量的正负离子，形成离子流场。在输电电压较低、输送容量较小时，上述现象较弱，未能引起人们的注意。随着输电电压和容量的不断提高，电磁场对周围环境中的人和物的影响才日益为人们所关注。

**工频电场** 它对环境的影响主要表现为能导致产生电击和长时间受电场作用的可能生态效应。在工频电场中处于地电位的人接触对地绝缘的导体，或对地绝缘的人接触接地物体时，都可能产生电击。按电击的严重程度不同可分为可感觉的电击、引起疼痛并使肌肉不自觉反应的电击(也称第二类电击)和能造成直接伤亡的电击(也称第一类电击)三种。输电线路和变电所的设计，要考虑当人们接触输电线下或高压设备附近的车辆或物体时，不允许发生第一类电击，并尽可能地减轻第二类电击的程度。电击按作用时间不同可分为暂态电击和稳态电击两种。

**暂态电击** 指处于地电位的人接触电场中对地绝缘的导电物体时，或对地绝缘的人接触接地物体时，在接触瞬间因静电感应积聚在该物体或人体上的电荷以火花放电的形式通过人体向大地释放所造成的电击。当释放的能量为 0.1mJ 时人可以感觉到。当释放能量为 0.5~1.5mJ 时，将使人有疼痛感和引起肌肉不自

觉的反应。对人有危险的暂态电击的释放能量大约为 25J。在高压设备附近或输电线路下发生的电击，绝大多数属于暂态电击。输电线路下和变电所内的大型车辆的放电能量一般不会超过 30mJ。决定暂态电击水平的主要因素是物体的感应电压和对地电容，而物体在电场中的感应电压除直接与电场强度大小有关外，还与物体对地绝缘的状况有关。

**稳态电击** 指处于地电位的人接触电场中的导电物体时，带电导体通过该导电物体的耦合电容进入该物体的工频电流通过人体流入大地所造成的电击。这种电击水平直接用电流大小来衡量。对于男子能感觉的电流约为 1mA，99.5%的人能自行摆脱的电流为 9mA；对妇女上述两种电流分别为 0.6mA 和 6mA。而儿童的摆脱电流约为 5mA。决定稳态电击电流的因素是该处工频电场和所接触的导电物体体积大小。

**生态效应** 关于长时期受工频电场作用的可能生态效应，前苏联根据 330~750kV 变电所工作人员的反映和调查，曾认为长期在工频电场下工作会对人的健康有影响。以后不少国家对这一问题进行了研究。多数研究者认为现有输电线路的电场水平，对人体健康并无有害影响；但也有一些研究者认为高的工频电场对生态会有一些影响。目前还不能对长期受电场作用而绝对没有有害影响做出结论。

**输电线路工频电场** 适当控制高压输电线下的工频电场强度值，是线路设计时所要考虑的技术问题之一。根据输电线路跨越农田、公路和邻近民房等不同情况，分别规定场强限值。目前国际上尚无统一的场强限值标准，比较一致的要求是：对于稳态电击限值的考虑，要求当人接触到线下对地绝缘的导电物体时，产生的电击不造成生理上的直接损伤，并能自行摆脱。为此，规定稳态电击电流不应超过 5mA。为减轻暂态电击给人造成的不舒适感，各国采取的场强限值差别较大。还有一些国家，出于生态效应的考虑，对输电线路附近人们经常出入地点的场强也作了限制。(见输电线路电场)

**变电所工频电场** 对 330kV 及其以上电压等级的变电所，工频电场的限值是设计时应考虑的主要条件之一。变电所工作人员接近带电高压设备的机会多，场强限值除要考虑暂态电击和稳态电击外，还要考虑电场长期作用可能的生态效应。但由于变电所工作人员通常均具有防止暂态和稳态电击知识，且每天在较高电场中停留的时间不长，因此各国都将变电所内的允许工频电场定得比线路邻近居民区和跨越公路处的要高。对运行人员经常巡视或检测必经的地方，一般规定为小于 8kV/m，其他地方则不大于 10kV/m，少数地区允许最大场强为 10~15kV/m。而变电所围墙处

场强则不大于  $5\text{kV/m}$ 。为满足这些要求,除适当提高带电体对地高度外,有时还采用合理安排带电体的排列以及并列或重叠回路的相序等措施,从结构布置上减小地面电场。 $500\text{kV}$  及以上的新变电所投运后,一般都要对变电所内电场进行一次全面测量,绘出高场强区的范围和电场分布。为避免火花放电引燃可燃气体,在变电所的工频电场区内禁止进行加入或取出汽油的作业。

**工频磁场** 交流电流流过输电线路或变电所的母线时,在其周围同时还产生工频磁场。交变的磁场在生物体内也会感应产生电场和电流。但与工频电场相比,工频磁场在人体内感应产生的电场和电流是很弱的。因此人们更关心的工频电场,而不是工频磁场。

与输电线路平行接近的伸长形导体(如金属栅栏、管道、通信线路等)会因工频磁场的作用产生沿线路方向的感应电动势。当这些伸长形导体的一端接地,人接触另一端或距接地端一定距离接触该导体时,导体上的感应电动势将通过人体和大地形成回路,会由此产生电击。衡量这种电击水平的指标与工频电场的相同。与工频电场相比,由工频磁场产生的这类电击,其感应电压较低,但感应电流较大。防止的方法是将这类伸长形导体两端和中部接地。

关于工频磁场长期作用后的生态效应,绝大多数研究者认为:输电线路产生的工频磁场对人体没有什么有害影响,且输电线路产生的实际工频磁场(一般在  $4\times 10^{-5}\text{T}$  以下)大大低于日常家用电器产生的磁场。但近年来亦有少数国家(如瑞典)基于对电磁场防护的考虑,在设计靠近城市的超高压输电线路时,把降低线下工频磁场作为设计时要考虑的问题之一。

**高频电磁场** 超高压及特高压输电线路和变电所的导线、金具以及其他带电导体和电气设备,在正常电压下会产生电晕放电。伴随电晕放电会产生杂乱的高频电磁波。当电磁波的强度超过限值后,会干扰调幅广播,有时还会影响电视的正常收看。因此,在选择输电线路和变电所的导线及其分布方式、金具和高电压设备时,要考虑限制电晕和无线电干扰的要求。首先是按线路走廊无线电干扰限值的要求,确定导线结构。由于输电线路延伸涉及面广,干扰作用影响面大,因此导线选择甚为重要。导线结构一旦确定,线路总的干扰水平也就相应确定了。减少输电线路无线电干扰的主要措施是采用分裂导线,使导线的表面电场减小,从而使电晕放电减弱(见输电线路电晕)。其次是确定线路和变电所中绝缘子串金具和主要高压设备的干扰水平。由于导线在线路建设中的投资比重最大,对线路总的干扰水平起控制作用,而绝缘子串和金具产生的干扰,通常不能影响线路总的干扰水平。变电所内的主要设备、

绝缘子串、母线和金具的干扰水平也是按其所注入线路的干扰电流不影响线路总的干扰水平来确定的。

输电线路的无线电干扰水平能够准确地计算出来。输电线路和变电所的设计可以把绝缘子串和主要设备的无线电干扰水平控制在规定的范围之内。线路和变电所投入运行后,可通过实测判定干扰的来源。如果干扰源是来自某个元件,可更换该元件来消除干扰。

**直流离子流场** 直流输电线路的导线发生电晕时,其空间带电离子的分布与交流输电线路有很大的不同。交流线路电晕时,由于电压极性同期性的变化,上半周期产生和导线同一极性的离子,在下半周又被导线拉回来。这样交流线路电晕产生的离子只在导线周围很小的范围内往返运动,输电线下广大空间不存在离子。直流线路电晕时与导线同极性的离子,离开导线后在电场作用下向着地面和另一极性的导线运动,因而在线下和线间整个空间都存在离子。直流离子流场能加强由导线电荷产生的空间电场,可使线下电场比无空间电荷存在时增大  $2\sim 3$  倍。当物体或人处于离子流场中时,有一部分离子流将被物体或人所截获,如物体系对地绝缘,被截获的离子将使物体具有高电位,人接触该物体时会产生电击。这种电击主要是聚积在物体上的电荷瞬时释放产生的暂态电击。由于流过人体的这种人能感觉的直流电流比交流大很多,而直流输电线下人的截获电流又比同级电压的交流线路下的感应电流小几个数量级,故直流输电线下一般不会发生稳态电击。表征直流输电线的环境电磁参数为离子电流密度、空间电荷密度以及由导线电荷与空间电荷共同作用而形成的合成电场。

**可听噪声** 伴随输电线路导线和变电所内带电导体的电晕放电,还产生使人烦恼的可听噪声。对  $500\text{kV}$  及以下的交流输电线路,在满足无线电干扰限值要求后,可听噪声限值也必然满足要求,只有对于  $750\text{kV}$  及以上的特高压输电线路,可听噪声的限制才对导线的选择起控制作用。(见输电线路可听噪声)

**电晕生成的臭氧** 输电线路导线和变电所内带电导体发生电晕后,在紧邻导线四周很薄的电晕层内,空气游离的同时还出现相应的化学反应,产生少量的臭氧和氮的氧化物。国外不少研究单位实测证明,高压输电线路产生的臭氧非常微弱,用一般仪表很难测出。经过对  $1150\text{kV}$  电压的试验线段和  $765\text{kV}$  运行线路的长期监测,亦未发现空气中臭氧含量由于线路的存在而明显增加。而大气中由于自然界的原因会自然产生臭氧。农村大气中臭氧的平均浓度通常在  $0.01\sim 0.03\text{ppm}$  之间,城市中还会略高一些。由于输电线路产生臭氧的浓度很低,不会对人、牲畜或植物产生明显的影响。

### 参考书目

国际大电网会议第 36.01 工作组著. 输电系统产生的电场和磁场. 邵方殷等译. 北京: 水利电力出版社, 1984

[美] 安德生等著. 345 千伏及以上超高压输电线路设计参考手册. 电力工业部武汉高压研究所译. 北京: 电力工业出版社, 1981

(邵方殷)

shupeidian dianya dengji

**输配电电压等级** (voltage levels of power transmission and distribution)

输电网与配电网中用于升高电压和降低电压的各级电压层次。电压等级在同一输电网或配电网中, 具有统一性, 在电力企业与制造行业之间, 具有标准性。

选择输配电的电压等级, 需要考虑的因素有: ①国家电压标准; ②本网电压系列; ③简化电压层次; ④全网经济效益; ⑤设备制造能力; ⑥电压等级的发展。

发展更高一级新电压等级, 一般要考虑: ①远距离大容量输电, 要以电力系统的中长期规划设计为依据, 总是至少以两回路分段方式组成, 以利于保证运行的可靠性, 并按此原则选择电压。即使是需要分期建设, 也应一次设计、分期施工。不以单回路定电压等级, 以免失之偏高。②电力系统容量不断增大, 使短路容量迅速增加。当达到原有断路器的最大短路容量时, 也需要建立更高一级电压的电力系统, 以便将原有系统开环运行, 以减小短路电流。③选择更高电压等级, 要与本网当前的电压系列相协调, 相邻两级电压之比不低于两倍。④决定新的电压等级, 不宜只根据一两个工程的技术经济比较来确定特殊电压等级, 以免形成电压层次偏多, 不利于运行维护。⑤决定新的电压等级, 还要考虑邻近电网互联的可能性, 电压相同的联网最为经济可靠。⑥决定新的电压等级, 也要兼顾国家电力设备制造和供应的能力, 统一电压等级有利于新设备的研制和供应。

**国家电压标准** 中国在 1949 年前各网自行其是, 电压等级比较繁复。1949 年后不断努力统一和简化电压等级, 逐步建立起中国国家电压标准, 从而于 1959 年第一次颁布国家标准 GB156《额定电压》。国家电压标准, 是统一电力企业、电力设备制造行业以及用电工业和用户之间电压系列的强制性技术标准。

中国的电压标准以系统额定电压表示, 有关输电与配电的电压等级为(括号内为设备最高电压): 220/380(230/400)V, 3(3.5) kV, 6(6.9) kV, 10(11.5) kV, 35(40.5) kV, 63(69) kV, 110(126) kV, 220(252) kV, 330(363) kV, 500(550) kV, 750(待定) kV。

美国输配电的电压等级, 在 230 kV 及以下各电力

公司自行其是, 极不一致。对于超高压与特高压的电压等级, 美国国家标准 ANSI C92.2 中提出推荐电压为: 超高压 345(362) kV, 500(550) kV, 765(800) kV; 特高压 1100(1200) kV。

西欧国家最高电压为 380~400 kV, 再上一级拟采用 800 kV, 将形成 800/400/220 kV 系列。

国际电工委员会的《IEC 标准电压》对输配电电压等级的选择, 提出两点建议: ①任一国家内, 相邻两级电压之比, 不应小于 2 倍; ②任一地理区域内, 对括号内的各种电压等级只能选用其中一种: (245、300、363 kV), (363、420 kV), (420、525 kV)。

国际大电网会议 (CIGRE) 与国际供电会议 (CIRED) 联合工作组报告提出推荐的相邻两级电压之比, 自超高压 (220~500 kV) 以下的为大于 3 倍, 自高压 (50~150 kV) 以下的为大于 5 倍。

苏联的国家电压标准, 与中国的国家电压标准大致相同, 没有明显的差别。

**电网电压系列** 在同一个电网中采用的各层次的电压等级, 组成本网的电压系列。国家电压标准是列举了允许使用的标准电压。电网电压系列中的各级电压, 必须符合国家电压标准, 同时又不必按表逐级依次采用。例如中国华北电网的电压系列是 500/220/110/35/10/0.38 kV, 这一模式在中国最为普遍。中国东北电网的电压系列则是 500/220/63/10/0.38 kV, 其特点是保留并发展 63 kV 以代替 110/35 kV 两级, 限制以至取消 154、40、22 kV 电压。中国西北电网有两种模式, 330/110 kV 和 220/110 kV 同时存在。

国外的输电电压系列, 大体上有三种模式(不考虑电压的细微差异, 按人数归类):

(1) 800/400/220/110 kV 系列。以英、法、德、瑞典为代表的一部分欧洲国家, 采用这种系列。瑞典从 1952 年开始发展 380/220 kV 系列, 以后提高为 400/220 kV 系列。50 年代末期, 瑞典当时受技术条件所限未能选用 500 kV, 如今又积重难返, 只有决定在 400 kV 之上叠加 800 kV。

(2) 1150/500/220/110 kV 系列。以苏、美、加为代表的幅员广阔的国家, 采用这种系列。1956 年苏联建成双回 400 kV 输电线路, 1962 年升压为 500 kV, 从此开拓建立了这种系列, 并普遍推广。

(3) 750/330/110 kV 系列。以加、苏、美为代表的已有 330/110 kV 系列的国家, 采用了这种系列, 而且他们又都是在同一国家内, 并存着 750/330/110 kV 与 1150/500/220/110 kV 两个电压系列。

1962 年国际大电网会议上, 超高压电压标准化国际工作组建议: ①原来主要采用 220 或 230 kV 的国家, 最好选用 500/230 kV 电压系列; ②原来主要采用



330 kV 或 345 kV 的国家,最好选用 750/330/110 kV 电压系列;③在一个国家内最好选用一种电压系列,以避免不同电压的电网互联时需要安装互联变压器,增加投资与运行费用。国际电工委员会第 38 号推荐标准中也提出:或者用 500/220 kV 系列,或者用 750/330/110 kV 系列。相邻两级电压之比,最好不低于两倍。

中国的实际情况是:①220 kV 电压目前在各省已经基本得到普及;②全国大部分地区是在 220 kV 之上叠加一级 500 kV 电压,已形成或正在形成 500/220/110 kV 系列;③只有西北地区是同时存在 220/110 kV 及 330/110 kV 两个系列,因而还存在如何确定其上一级电压的问题。

**简化电压层次** 电网的电压系列是本网统一规定并形成的电压等级分层序列,但在具体应用于某一特定地点,则可以完全依次沿用,也可以越级使用,以利于减少降压层次,节约变电损失。例如中国绝大多数电网的电压系列是:220/110/35/10/0.38 kV,而有些城市、有些地区已简化降压层次为 220/110/10 kV 或 220/35/10 kV,其特点是从中越过一级,还不是从全网中取消一个电压等级。这样已经可以获得较大的经济效益。至于原有 3.3 kV 和 6.6 kV 两级电压等级,则绝大部分升压为 10 kV,从本网中逐步取消这两级电压,以达到简化电压层次的目的。

**全网经济效益** 选择输配电电压必须考虑到全网的经济效益,其基本原则是:①在遵守国家电压标准,依照本网电压系列,考虑电网发展的前提下,选择有利于提高全网经济效益的适当的电压;②选择电压要以系统的概念,权衡全网经济效益,而不局限于本线路工程的经济效益。

**电压等级的发展** 主要考虑统一联网电压和发展更高电压等级两方面的问题。

(1)统一联网电压。以输电形成相邻电力系统之间的联网是电力系统发展的客观规律,也是一次能源分布特点及实现电力系统经济效益的需要。联网的最有利条件,是统一相连电力系统的电压等级。国际大电网会议建议:在一个国家内,最好选用一种电压系列,以避免不同电压的电力系统互联时,需要安装互联变压器而增加投资与运行费用。

当前幅员广阔的国家如美、苏、加等,都已经同时存在着相当于 500/220/110 kV 及 750/330/110 kV 两个系列,形成了积重难返的局面,而且今后特高压发展趋势又各行其是地分别发展 1150/500 kV 及 1500/750 kV 系列,更难以统一。

中国统一联网电压的条件很优越,七个大区电力系统已有六个采用 500/220/110 kV 电压系列,只有西北电网同时存在着 330/110 kV 及 220/110 kV 两个系

列。

(2)发展更高电压等级。中国在 500 kV 等级之上,将发展 1150 kV 特高压。世界各国考虑采用 1000 kV 级特高电压的原因与条件不尽相同,但可以作为参考:①本网自身容量增大,各网之间需要加强联网,如美、苏等;②远距离大容量输电;③大容量输电与限制短路电流,以及避免环流和电磁环网,如日本拟建双回 1000 kV 特高压输电线路,并将 500 kV 电力系统解分开分为三个部分。

(徐博文)

snuperdian jishu biao zhun

**输配电技术标准** (technical standard for

power transmission & distribution) 输配电

领域对需要统一的技术要求所作的技术规定,是输配电技术规范、技术规程和技术导则等的统称。输配电技术标准是输配电的设备制造、工程建设和运行维护的技术依据。按照标准的制订和发布机构的不同,输配电技术标准通常可分为国际标准、世界区域标准、国家标准、行业(专业)标准和企业标准,有时还有一个国家内的地方标准。按照标准化对象的不同,通常可分为基础标准、电气安全工作标准、架空线路和变电所标准、电力电缆线路标准、高压电气设备标准、绝缘配合和高电压试验标准以及环境电磁标准。输配电方面的国际标准,主要有国际标准化组织(International Standardization Organization, ISO)的标准、国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)的标准和国际电报电话咨询委员会(International Telegraph and Telephone Consultive Committee, CCITT)的标准。国际上常被引用的国家标准有美国的 ANSI 标准、德国的 DIN 标准、苏联的 ГОСТ 标准和日本的 JIS 标准。国际电工委员会标准在输配电技术方面是门类比较齐全和影响比较大的国际标准。中国输配电方面的国家标准和行业标准,有相当一部分是参照 IEC 标准制订的。

**输配电基础标准** 在一定范围内作为输配电技术的基础和具有指导意义的标准。主要有名词术语、图形符号、额定电压、环境条件分类和环境试验等标准。这类标准的主要作用是推进标准化对象的性能参数和表示方法在国际间的统一和规范化。

**名词术语标准** IEC 的名词术语技术委员会(TC1)制订的《国际电工词汇》(International Electrotechnical Vocabulary),是电工技术的术语汇编。该词汇编列了英、法、荷、德、意、波、俄、西班牙和瑞典 9 种文字的术语,并以英文和法文给出定义。它比较齐全地提供了输配电方面的名词术语。此外,



IEC 其他技术委员会制订的标准中常有名词术语部分或独立的名词术语标准。中国参照 IEC 的《国际电工词汇》和其他标准制订发布的输配电方面的名词术语国家标准列于表 1。

表 1 中国与输配电有关的主要名词术语国家标准

标准编号	标 准 名 称
GB2900.1	电工名词术语 基本名词术语
GB2900.5	电工名词术语 电工绝缘材料
GB2900.8	电工名词术语 绝缘子
GB2900.10	电工名词术语 电线电缆
GB2900.11	电工名词术语 蓄电池
GB2900.12	电工名词术语 避雷器
GB2900.15	电工名词术语 变压器、互感器、调压器、电抗器
GB2900.16	电工名词术语 电力电容器
GB2900.17	电工名词术语 继电器及继电保护装置
GB2900.19	电工名词术语 高电压试验技术和绝缘配合
GB2900.25	电工名词术语 电机
GB2900.32	电工名词术语 电力半导体器件
GB2900.33	电工名词术语 变频器
GB2900.35	电工名词术语 爆炸性环境用防爆电气设备
GB2900.36	电工名词术语 电力牵引
GB2422	电工电子产品基本环境试验规程 名词术语
GB3187	可靠性基本名词术语和定义
GB4365	无线电干扰名词术语
GB4776	电气安全名词术语
GB5075	电力金具名词术语
GB5169.1	电工电子产品着火危险试验名词术语
GB6988.1	电气制图 术语
GB8582	电工电子设备机械结构术语
GB11804	电工电子产品环境条件术语

图形符号标准 IEC 的电气图形符号标准列于表 2。中国的电气图形符号国家标准列于表 3。

表 2 IEC 的电气图形符号标准

标准编号	标 准 名 称
IEC113	图解、图表、表格
IEC416	图形符号绘制的通用原则
IEC417	设备用图形符号
IEC617	简图用图形符号
IEC750	电气技术中的项目代号
IEC848	控制系统功能图表的绘制

额定电压、额定频率和电流等级标准 IEC 的标准有《标准电压》(IEC38)、《标准电流参数》(IEC59)和《标准频率》(IEC196)。中国的额定电压、额定频率和

电流等级国家标准列于表 4。

表 3 中国的主要电气图形符号国家标准

标准编号	标 准 名 称
GB4728	电气简图用图形符号
GB5094	电气技术中的项目代号
GB5465.1	电气设备图形符号绘制原则
GB5465.2	电气设备用图形符号
GB6988	电气制图
GB7093	图形符号表示规则
GB7159	电气技术中的文字符号制订通则
GB7356	电气系统说明书用简图的编制

表 4 中国的额定电压、额定频率和  
电流等级国家标准

标准编号	标 准 名 称
GB156	标准电压
GB762	电气设备额定电流
GB1980	电气设备额定频率
GB12325	电能质量 供电电压允许偏差
GB12326	电能质量 电压允许波动和闪变

环境条件分类和环境试验标准 IEC 的主要标准列于表 5，中国的国家标准列于表 6。

表 5 IEC 的主要环境条件分类和环境试验标准

标准编号	标 准 名 称
IEC68	基本环境试验规程
IEC355	大气腐蚀加速试验问题评定
IEC653	超声波清洗的一般考虑
IEC721	环境条件分类

表 6 中国的主要环境条件分类和环境  
试验国家标准

标准编号	标 准 名 称
GB934	高温作业环境气象条件测定方法
GB935	高温作业允许持续接触时间限值
GB4796	电工电子产品环境参数分类及其严酷程度分级
GB4797	电工电子产品自然环境条件
GB4798	电工电子产品应用环境条件
GB10586	湿热试验箱技术条件
GB10587	盐雾试验箱技术条件
GB10588	长霉试验箱技术条件
GB10589	低温试验箱技术条件
GB10590	低温/低气压试验箱技术条件
GB10591	高温/低气压试验箱技术条件

续表

标准编号	标 准 名 称
GB10592	高低温试验箱技术条件
GB11158	高温试验箱技术条件
GB11159	低气压试验箱技术条件
GB11279	电子元器件环境试验使用导则

**电气安全工作标准** 在输配电的施工安装和运行维护作业中防止电气人身伤害的技术标准。IEC 的主要输配电电气安全标准列于表 7，中国的主要输配电电气安全国家标准和行业标准列于表 8。

表 7 IEC 的主要电气安全工作标准

标准编号	标 准 名 称
IEC529	外壳防护等级
IEC743	带电作业工具和设备术语
IEC832	带电作业工具用绝缘棒及万能工具配件
IEC855	带电作业工具用泡沫填充绝缘管和实心棒
IEC895	标称交流电压达到 800 kV 时带电作业用导电衣
IEC900	交流 1000V 和直流 1500V 带电作业用手工工具
IEC903	带电作业用绝缘手套和连指手套规范

表 8 中国的主要电气安全工作标准

标准编号	标 准 名 称
GB4208	外壳防护等级的分类
GB2894	安全标志
GB3805	安全电压
GB6568. 1	带电作业屏蔽服
GB6568. 2	带电作业屏蔽服试验方法
GB7450	电气设备安全设计导则
GB8838	电工作业人员安全技术考核标准
GB12168	带电作业用屏蔽罩
GB13395	电力设备带电水冲洗规程
SDJ63	电力建设安全工作规程 电气和热控篇
SDJ65	电力建设安全工作规程 架空输电线路篇
DL408	电业安全工作规程(发电厂、变电所电气部分)
DL409	电业安全工作规程(电力线路部分)

**架空线路和变电所标准** 包括架空输电线路和配电线路、变电所和配电变电所的设备制造标准(见表 9、表 10)、工程建设标准(见表 11、表 12)和运行维护标准。

运行维护标准包括架空线路和变电所设备的巡视监护、检修和预防性试验标准。中国的输配电运行维护标准主要有《架空送电线路运行规程》、《架空配电线路

表 9 IEC 的主要架空线路和变电所的制造标准

标准编号	标 准 名 称
IEC826	架空输电线路的载荷和强度
IEC652	架空线路铁塔的载荷试验
IEC209	钢芯铝导线
IEC210	钢芯铝合金导线

表 10 中国的主要架空线路和变电所的制造标准

标准编号	标 准 名 称
GB369	环形钢筋混凝土电杆(离心成型)
GB1179	铝绞线及钢芯铝绞线
GB1200	镀锌钢绞线
GB2694	输电线路铁塔制造技术条件
GB8349	离相封闭母线
GB9329	铝合金绞线及钢芯铝合金绞线
SD320	箱式变电站技术条件
ZBK4001	组合式变电站

表 11 中国的主要架空线路和变电所设计标准

标准编号	标 准 名 称
GBJ52	工业与民用供电系统设计规范
GBJ53	工业与民用 10kV 及以下变电所设计规范
GBJ54	低压配电装置及线路设计规范
GBJ55	工业与民用通用设备电力设计规范
GBJ56	电热设备电力装置设计规范
GBJ58	爆炸和火灾危险场所电力装置设计规范
GBJ59	工业与民用 35 kV 变电所设计规范
GBJ60	工业与民用 35kV 高压配电装置设计规范
GBJ61	工业与民用 35 kV 及以下架空电力线路设计规范
GBJ62	工业与民用电力装置的继电保护和自动装置设计规范
GBJ63	工业与民用电力装置的测量仪表装置设计规范
GBJ64	工业与民用电力装置的过电压保护设计规范
GBJ65	工业与民用电力装置的接地设计规范
SDJ2	220~500 kV 变电所设计技术规程
SDJ3	架空送电线路设计技术规程
SDJ4	架空配电线路设计技术规程
SDJ5	高压配电装置设计技术规程
SDJ6	继电保护和自动装置设计技术规程
SDJ7	电力设备过电压保护设计技术规程
SDJ8	电力设备接地设计技术规程
SDJ9	电气测量仪表装置设计技术规程
SDJ25	并联电容器装置设计技术规程
SDJ26	火电厂、变电所电缆选择设计技术规程
SD119	500 kV 电网过电压保护绝缘配合电气设备接地暂行技术规定

表 12 中国的主要架空线路和变电所  
施工及验收标准

标准编号	标 准 名 称
GBJ147	电气装置安装工程高压电器施工及验收规范 电气装置安装工程电力变压器、油浸电抗器、 互感器施工及验收规范
GBJ148	
GBJ149	电气装置安装工程母线装置施工及验收规范
GBJ232	电气装置安装工程施工程序及验收规范
GBJ233	110~500 kV 架空电力线路施工及验收规范
SD301	交流 500kV 电气设备交接和预防性试验规程

及设备运行规程》和《电气设备预防性试验规程》等行业标准。

**电力电缆线路标准** 包括电力电缆线路的电缆本体及附件的制造标准和工程建设标准。

**制造标准** IEC 的电力电缆标准列于表 13。中国的电力电缆国家标准列于表 14。

表 13 IEC 的主要电力电缆标准

标准编号	标 准 名 称
IEC55	18~30 kV 纸绝缘金属护层电缆的结构和试验方法
IEC141	充油电缆和压气电缆及其附件的试验 具有特殊功能的电缆外护层
IEC229	
IEC287	电缆连续额定电流计算 (100%负荷率)
IEC331	电缆的耐火特性
IEC332	电缆在燃烧条件下的试验
IEC502	额定电压 30 kV 及以下固体挤压聚合电缆
IEC540	电缆和软线绝缘与护层的试验方法
IEC811	电缆绝缘材料和护层材料的试验方法
IEC840	额定电压 30 kV 以上至 150 kV 挤压绝缘电 力电缆的试验
IEC853	电缆的周期性电流和事故电流计算
IEC885	电缆的电气试验方法
IEC949	非绝热条件下的允许热短路电流计算

表 14 中国的主要电力电缆国家标准

标准编号	标 准 名 称
GB2951	电线电缆 机械物理性能试验方法 电缆外护套
GB2952	
GB3048	电线电缆 电性能试验方法
GB5589	电缆附件试验方法
GB9326	交流 330 kV 及以下油纸绝缘自容式充油电 缆及附件
GB9327	电缆导体压缩和机械连接接头试验方法
GB11017	额定电压 110 kV 铜芯、铝芯交联聚乙烯绝 缘电缆
GB11033	额定电压 26/35 kV 及以下电力电缆附件基 本技术要求

续表

标准编号	标 准 名 称
GB12706	额定电压 35 kV 及以下铜芯、铝芯塑料绝缘 电力电缆 额定电压 35 kV 及以下铜芯、铝芯纸绝缘电 力电缆
GB12976	

**工程建设标准** IEC 的标准有《高压电缆选择导则》(IEC183)。中国的国家标准和行业标准有《电气装置安装工程施工及验收规范》(GBJ232)的电缆线路篇和电气设备交接试验篇、《火电厂、变电所电缆选择与敷设规程》(SDJ26)、《高压充油电缆施工工艺规程》(DL453)以及《35 kV 及以下电力电缆热缩附件应用技术条件》(DL413)。

**高压电气设备标准** 包括：①开关设备及控制设备标准 (见表 15、表 16)；②电力变压器和电抗器标准 (见表 17、表 18)；③电流互感器和电压互感器标准 (见表 19、表 20)；④电力电容器标准 (见表 21、表 22)；⑤绝缘子标准 (见表 23、表 24)；⑥避雷器标准 (见表 25、表 26)；⑦电气测量仪表标准 (见表 27、表 28)；⑧电力金具标准 (见表 29)；⑨液体和气体绝缘介质标准 (见表 30、表 31)；⑩高压直流输电设备、蓄电池和电力载液设备的标准 (见表 32、表 33)。

表 15 IEC 的主要开关设备及控制设备标准

标准编号	标 准 名 称
IEC56	交流高压断路器 交流隔离开关和接地开关 高压开关 断路器反相试验导则 高压熔断器 额定电压 1~72.5 kV 交流金属封闭式开关 设备及控制设备 高压交流开关熔断器 交流高压断路器合成试验 额定电压 1~38 kV 交流绝缘封闭式开关设 备的控制设备 高压交流接触器 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封 闭式开关设备 并联电力电容器外部保护用高压熔断器 电动机电路用高压熔断体规范 高压开关设备及控制设备标准的通用条款 变压器电路用高压熔断器和熔断体选择的 应用导则 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封 闭式开关设备用电缆连接器
IEC129	
IEC265	
IEC267	
IEC282	
IEC298	
IEC420	
IEC427	
IEC466	
IEC470	
IEC517	
IEC549	
IEC644	
IEC694	
IEC787	
IEC859	

表 16 中国的主要开关设备及控制设备标准

标准编号	标 准 名 称
GB763	交流高压电器在长期工作时的发热
GB1984	交流高压断路器
GB1985	交流高压隔离开关和接地开关
GB2706	交流高压电器的动热稳定试验方法
GB3309	高压开关设备常温下的机械试验
GB3804	交流高压负荷开关
GB3906	3~35kV 交流金属封闭式开关和控制设备
GB4473	交流高压断路器的合成试验
GB4474	交流高压断路器的近区故障试验
GB4876	交流高压断路器的线路充电电流开合试验
GB7674	六氟化硫封闭式组合电器
GB7675	交流高压断路器的开合电容器组试验
GB8905	六氟化硫电气设备中气体管理和测试方法
GB11022	高压开关设备通用技术条件
GB11023	高压开关设备六氟化硫气体密封试验导则
ZBK43001	高压六氟化硫断路器通用技术条件
ZBK43004	35kV 户内真空断路器技术条件

表 17 IEC 的主要电力变压器和电抗器标准

标准编号	标 准 名 称
IEC76	电力变压器
IEC214	有载分接开关
IEC289	电抗器（适用于消弧线圈、接地变压器等）
IEC354	油浸变压器负载导则
IEC542	有载分接开关使用导则
IEC551	变压器和电抗器的声级测量
IEC606	电力变压器使用导则
IEC616	电力变压器的接线端子和接线标志
IEC722	电力变压器和电抗器的雷电冲击试验和操作冲击试验导则
IEC726	干式电力变压器（适用于电压低于 36 kV 的电力变压器）
IEC742	隔离变压器和安全隔离变压器技术要求（适用于电压不超过 1000 V，频率不超过 500Hz）
IEC905	干式变压器负载导则

表 18 中国的主要电力变压器和电抗器标准

标准编号	标 准 名 称
GB1094	电力变压器
GB6450	干式电力变压器
GB6451	三相油浸式电力变压器技术参数和要求
GB7328	变压器和电抗器声级测定
GB7449	电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则
GB8286	矿用隔爆型移动变压器
GB10228	三相空气自冷式电力变压器技术条件

续表

标准编号	标 准 名 称
GB10229	电抗器
GB10230	有载分接开关
GB10237	电力变压器 绝缘水平和绝缘试验 外绝缘的空气间隙
GB/T10584	有载分接开关应用导则
ZBK41002	电弧炉变压器
ZBK41004	无励磁分接开关
ZBK41006	试验变压器
ZBK42001	调压器
ZBK43003	控制或照明用小型干式变压器

表 19 IEC 的主要电流互感器和电压互感器标准

标准编号	标 准 名 称
IEC185	电流互感器
IEC186	电压互感器
IEC44-3	两用互感器
IEC44-4	局部放电测试

表 20 中国的主要电流互感器和电压互感器国家标准

标准编号	标 准 名 称
GB1207	电压互感器
GB1208	电流互感器
GB4703	电容式电压互感器
GB5583	互感器局部放电测量

表 21 IEC 的主要电力电容器标准

标准编号	标 准 名 称
IEC70	电力电容器
IEC143	电力系统用串联电容器
IEC358	耦合电容器及电容分压器
IEC593	并联电容器用内部熔断器和内部过电压隔离器
IEC595	串联电容器用内部熔断器
IEC871	额定电压大于660V交流电力系统用并联电容器
IEC996	电容器介质损耗因数测量的准确度校核方法

表 22 中国的主要电力电容器标准

标准编号	标 准 名 称
GB3983.1	低电压并联电容器
GB3983.2	高电压并联电容器
GB4705	耦合电容器及电容分压器
GB6115	串联电容器
GB6915	高原电力电容器
GB6916	湿热带电力电容器

续表

标准编号	标 准 名 称
GB11024	高压并联电容器耐久性试验
GB11025	并联电容器用内部熔丝和内部过电压隔离器
ZBK48001	电力电容器局部放电测量
ZBK48003	并联电容器电气试验规范

表 23 IEC 的主要绝缘子标准

标准编号	标 准 名 称
IEC137	交流电压高于 1000 V 的套管
IEC168	额定电压高于 1000 V 系统用户内户外陶瓷或玻璃支柱绝缘子的试验
IEC273	额定电压高于 1000 V 系统用户内户外陶瓷或玻璃支柱绝缘子的特性
IEC305	盘形和针形悬式绝缘子串元件特性
IEC383	额定电压高于 1000 V 架空线路用陶瓷或玻璃绝缘子的试验
IEC433	长棒形绝缘子串元件特性
IEC506	高压绝缘子操作冲击波试验
IEC507	交流高压绝缘子的人工污秽试验
IEC660	额定电压 1~300 kV 系统用有机材料户内支柱绝缘子的试验
IEC720	线路支柱绝缘子的特性
IEC815	污秽条件下绝缘子的选用导则

表 24 中国的主要绝缘子标准

标准编号	标 准 名 称
GB768	电站用户外针式支柱绝缘子
GB769	电站用 35 kV 及以下户内支柱绝缘子
GB770	电站用 35 kV 及以下户外穿墙套管
GB771	电站用 35kV 及以下户内穿墙套管
GB775	绝缘子试验方法
GB1000	高压线路针式绝缘子
GB1001	盘形悬式绝缘子技术条件
GB7253	盘形悬式绝缘子串元件尺寸与特性
GB1247	铝导体及母线式穿墙套管
GB1248	户外棒式支柱绝缘子
GB1390	高压线路蝶式绝缘子
GB4109	交流电压高于 1000 V 的套管通用技术条件
GB5582	高压电力设备外绝缘污秽等级
GB8287.1	高压支柱绝缘子技术条件
GB8287.2	高压支柱绝缘子尺寸与特性
GB11029	高压线路瓷横担绝缘子
GB12944.1	高压穿墙套管技术条件
GB12944.2	高压穿墙套管尺寸与特性
JB/T5895	污秽地区绝缘子使用导则
ZBK5002	盘形悬式玻璃绝缘子玻璃制件外观质量
ZBK5006	高压架空线路绝缘地线用盘形悬式瓷绝缘子

续表

标准编号	标 准 名 称
ZBK5008	高压线路耐污盘形悬式绝缘子
ZBK5009	直流高压线路用盘形悬式绝缘子

表 25 IEC 的主要避雷器标准

标准编号	标 准 名 称
IEC99-1	交流有间隙阀式避雷器
IEC99-2	排气式避雷器
IEC99-3	避雷器的人工污秽试验
IEC99-4	交流无间隙金属氧化物避雷器

表 26 中国的主要避雷器标准

标准编号	标 准 名 称
GB7327	交流系统用碳化硅阀式避雷器
GB11032	交流无间隙金属氧化物避雷器
ZBK49004	直流有串联间隙金属氧化物避雷器
ZBK49005	交流有串联间隙金属氧化物避雷器
JB/T5894	交流无间隙金属氧化物避雷器使用导则

表 27 IEC 的主要电气测量仪表标准

标准编号	标 准 名 称
IEC51	直接动作指示电气测量仪表及其附件
IEC145	无功电度表
IEC258	直接记录电气测量仪表及其附件
IEC414	指示式和记录式电气测量仪表及其附件的安全要求
IEC484	间接动作电气测量仪表
IEC514	2 级交流电度表的验收方法
IEC521	0.5 级、1 级和 2 级交流电度表
IEC523	直流电度表
IEC687	静止式电度表 0.2s 和 0.5s 级的计量规范
IEC1036	交流静止式电度表 (1 级和 2 级)

表 28 中国的主要电气测量仪表标准

标准编号	标 准 名 称
GB776	电气测量仪表通用技术条件
GB3924	交流有功和无功电度表
GB3925	0.2 级交流电度表的验收方法
GB3927	直流电位差计
GB11167	直接动作电测量记录仪
ZBN21001	电流表和电压表
ZBN21004	万用电表
ZBN21006	频率表
ZBN21008	功率表和无功功率表
ZBN21009	相位表功率因数表和同步指示器



表 29 中国的主要电力金具国家标准

标准编号	标 准 名 称	标准中金具适用范围
GB2318	悬垂线夹	架空线路
GB2329	U 形螺丝	
GB2330.2	牵引板	
GB2331	接续管	
GB2333	补修管	
GB2334	线卡子	
GB2335.1	并沟线夹	
GB2335.2	跳线线夹	
GB2336	防振锤	
GB2337	预绞丝	
GB2338	间隔棒	
GB2339	均压屏蔽环	
GB2340	T 形线夹	发电厂和变电所
GB2341	设备线夹	
GB2342	铜铝过渡接头	
GB2343	母线伸缩节	
GB2344	硬母线固定金具	
GB2345	软母线固定金具	
GB2320	耐张线夹	架空线路、发电厂和变电所
GB2323	球头挂环	
GB2324	碗头挂环	
GB2325	U 形挂环	
GB2326.1	挂环	
GB2326.2	拉杆	
GB2327	挂板	
GB2328	联板	
GB2330.1	调整板	

表 30 IEC 的主要液体和气体绝缘介质标准

标准编号	标 准 名 称
IEC74	绝缘油氧化稳定性的评价方法
IEC156	绝缘油电气强度的测定方法
IEC247	绝缘液体相对介质常数、介质损耗因数和直流电阻率的测量
IEC296	变压器和开关设备新的矿物绝缘油规范
IEC376	新的六氟化硫的规格和验收
IEC422	电气设备中矿物绝缘油的维护和管理导则
IEC465	带油槽电缆用新矿物绝缘油规范
IEC474	抗氧化矿物绝缘油氧化稳定性试验方法
IEC475	液体电介质的取样方法
IEC480	电气设备的六氟化硫检测方法导则
IEC567	充油电气设备的气体 and 油的取样以及游离和溶解气体分析导则
IEC588	变压器和电容器用氯化联苯
IEC590	新的矿物绝缘油芳香烃含量的测定
IEC599	运行中变压器和其他充油电气设备内气体分析和解释

续表

标准编号	标 准 名 称
IEC628	绝缘液体在电场和电离作用下的析气
IEC897	绝缘液体的雷电冲击击穿电压测定方法

表 31 中国的主要液体和气体绝缘介质标准

标准编号	标 准 名 称
GB507	电气用油绝缘强度测定法
GB2536	变压器油
GB4624	电容器油
GB7252	变压器油中溶解气体分析和判断导则
GB7595	运行中变压器油质量标准
GB7597	电力用油（变压器油、汽轮机油）取样
GB7598	运行中变压器油、汽轮机油水溶性酸测定法（比色法）
GB7599	运行中变压器油、汽轮机油酸值测定法（BTB 法）
GB7600	运行中变压器油水分含量测定法（库仑法）
GB7601	运行中变压器油水分测定法（气相色谱法）
GB7602	运行中汽轮机油、变压器油 T501 抗氧化剂含量测定法（分光光度法）
GB7603	矿物绝缘油中芳碳含量测定法（红外光谱分析法）
GB7604	矿物绝缘油芳烃含量测定法
GB11142	绝缘油在电场和电离作用下析气性测定法
SD305	六氟化硫气体中水分含量测定法（重量法）
SD306	六氟化硫气体中水分含量测定法（电解法）
SD307	六氟化硫新气中酸度测定法
SD308	六氟化硫新气密度测定法
SD309	六氟化硫气体中可水解氟化物含量测定法
SD310	六氟化硫气体中矿物油含量测定法（红外光谱分析法）
SD311	六氟化硫新气中空气、四氟化碳的气相色谱测定法
SD312	六氟化硫气体毒性生物试验方法
DL450	绝缘油中含气量的测试方法

表 32 IEC 的高压直流输电设备、蓄电池和电力载波设备的主要标准

标准编号	标 准 名 称
IEC633	高压直流输电术语
IEC700	高压直流输电半导体阀试验
IEC95	启动用铅酸蓄电池
IEC285-1	碱性蓄电池和电池组
IEC896-1	固定式铅酸蓄电池
IEC251	线路阻波器
IEC481	电力载波系统的耦合装置

表 33 中国的高压直流输电设备、蓄电池和电力载波设备的主要国家标准

标准编号	标 准 名 称
GB3859	半导体电力变流器
GB10236	半导体电力变流器与电网互相干扰及其防护方法导则
GB5008	启动用铅酸蓄电池
GB9368	镉镍碱性蓄电池
GB9369	镉镍碱性蓄电池组
GB7329	电力线载波结合设备
GB7330	交流电力系统线路阻波器

**绝缘配合和高电压试验标准** IEC 和中国的主要绝缘配合和高电压试验标准分别列于表 34 和表 35。

表 34 IEC 的主要绝缘配合和高电压试验标准

标准编号	标 准 名 称
IEC71	绝缘配合
IEC52	利用球间隙（一球接地）测量电压的标准
IEC60	高电压试验标准
IEC270	局部放电测量

表 35 中国的主要绝缘配合和高电压试验国家标准

标准编号	标 准 名 称
GB331.1	高压输变电设备的绝缘配合
GB331.7	高压输变电设备的绝缘配合使用导则
GB331.2~331.6	高电压试验技术
GB7354	局部放电测量
GB7449	雷电波和操作冲击波试验导则

**环境电磁标准** 电力线路和变电所的电磁干扰和危险影响防护措施的技术标准。国际电报电话咨询委员会（CCITT）制订的《关于防止电力线路有害影响的长途电信线的保护导则》和国际无线电干扰特别委员会（International Special Committee on Radio Interference, CISPR）制订的《架空电力线路和高电压设备无线电干扰特性》（CISPR18），是两个影响比较大的国际标准。中国制订的有关国家标准列于表 36。

表 36 中国的主要电磁环境国家标准

标准编号	标 准 名 称
GB6364	航空无线电导航台站电磁环境要求
GB6830	电信线路遭受强电线路危险影响的容许值
GB7349	高压架空输电线、变电站无线干扰测量方法
GB7495	架空电力线路与调幅广播收音台的防护间距
GB11604	高压电气设备无线干扰测量方法

（张大珉）

shupei dian jishu jingji

**输配电技术经济** (technology & economy of power transmission & distribution)

以电力网的观点从单项工程着手，实现输电与配电的先进技术与经济效益的统一。输电技术经济问题与配电技术经济问题有不同的性质和特点，有不同的技术措施和经济对策。但在输电与配电的电压相邻近的等级上，也有相同之处，特别是在 220 kV 电压等级上，有时它是属于输电性质，有时它又是配电的电源部分，在这种情况下，输电与配电的技术经济是可以互相参照的。

**输 电 技 术 经 济**

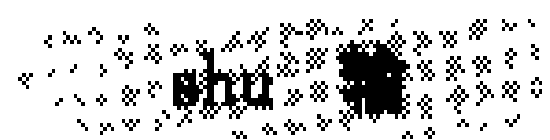
输电技术经济问题可以划分为四个层次来分析：①一次能源输送系统的作用；②电力系统中的作用；③远距离输电技术经济措施；④工程设计技术经济指标。

**输电取代输送一次能源** 输电是能源输送系统的一个重要的技术经济措施。水力是一次能源，只有通过转化为二次能源—电力，才能远距离输送。所以开发水力资源与输电是并存的，特别是需要远距离输送时。此外，在煤炭基地建立矿口电厂，以输电代替输煤，解决煤炭运输困难，并使煤电联营以至规划设计煤电综合体成为可能，其巨大的经济效益在可行性研究中，常常成为优越的条件。

**输电线路组成电力系统的坚强网架** 无论输电线路是以输电为主，还是以输电兼联网为目的，它都常常是大电力系统的重要组成部分。输电的技术经济作用不仅是在输电线路本身，而且必然涉及全系统的技术安全与经济效益。输电的可行性研究，首先要从整体效益出发，然后方可论及输电本身的技术经济（见输配电技术展望）。以网的观点研究输电方案，首先是采用交流输电与直流输电的比较。（见直流输电与交流输电）

**输电本身的技术经济** 最主要、最突出的是远距离大容量输电问题以及高电压输电问题。其中最为重要的是电压等级的选择（见输配电电压等级）。远距离输电与中短距离输电的技术措施截然不同，需要很多技术措施以满足远距离输送大功率的要求（见远距离输电），特别是需要多种补偿措施（见输电网无功补偿与电压调整）。输电工程本身的经济效益，在于工程建设投资与运行费用的比较，而这些比较的前提是电网的总体效益。

**输电工程设计技术经济指标** 是指同类工程设计之间的对比。输电工程一般包括输电线路工程与变电所工程，它们有分别的技术经济指标（见输电线路技术经济指标、变电所技术经济指标）。工程的技术经济指标，只反映工程设计是否技术先进、经济合理。它的最主要的技术经济效果，还是在于它在电网中的效益，以



及能源系统中的效益。

## 配 电 技 术 经 济

配电技术经济最重要的是表现在配电网的整体经济性。单项工程的技术经济性只是配电网中的一个很小的局部,它的作用终于要反映在配电网的整体效益上。重要的技术措施与经济对策也都是对配电网而言的。

整个电力企业中,发电、输电与配电的投资比例,在世界各工业发达国家中约为 $3:1:2$ ,在中国约为 $4:1:2$ (因中国的电缆线路较少)。发电厂发出的电能要通过输电网,再经配电网方能提供给用户使用,并以电费形式收回电力工业投资,取得利润。因此,慎重研究配电网的规划建设、结构设计及其运行技术,对于节约电力工业建设资金,创造更好的经济效益,都具有十分重要的意义。由于发电厂与输电网建设的投资比较集中,设备与技术比较庞大和繁复,相比之下,配电网的建设与改进都比较分散,易被人们忽视。

**配电网经济问题** 配电网的建设与运行,与城市市政建设、农村经济建设关系密切。不仅要考虑配电网本身的经济效益,还应综合考虑配电网的社会经济效益。对配电网的综合经济效益应从以下四个方面研究,以最少的投资尽早地取得最大的经济效益。

(1) 配电网的新建、扩建。要与原有配电网密切结合,包括配电电压等级选择、设备选择、网络结构等。

(2) 配电网的建设要与当地城市和农村的经济建设规划相协调。特别是在土地使用、环境保护、通信干扰等方面都要遵守当地有关法令和经济条例。对未来若干年内计划建设的线路、变电所等,要预留位置,准备建设条件。

(3) 配电网规划要有充分的预见性。不仅能适应配电网近期用电发展计划的实施,并能适应配电网中期发展的需要,更能为配电网远期发展目标作出充分考虑。应使配电网工程建设逐年投运量、在建工程量和规划工程量之间有一定比例,使工程投资按计划地、均匀地发挥效益。因此,配电网结构要有足够的储备容量,使主干线路的容量在较长时期内满足要求,不必重建主干线路,使主要的配电变电所在较长时期内仅需随负荷的增长而调换主变压器容量,而不必改动建筑结构。

(4) 配电网应有目标地进行改造。改造的目的主要是:①消除严重影响安全运行的设备;②改进网络中限制设备出力的环节,包括更换设备与改进网络接线;③提高配电网供电可靠性;④提高供电质量。配电网改造工作的前提,是要有充足的资金来源和足够的劳动力。必须充分考虑配电网改造的必要性和可行性后,才能

最终确定改造计划。

**配电网技术措施** 在配电网生产技术和管理工作的现代化发展方向上,主要有以下五个方面的技术措施。

采用高效能低能耗的设备 例如大额定电流和大短路容量的断路器,主要用于高负荷密度的用电地区;低铁损的变压器;容量大、体积小、占地少的配电装置等等。

简化电压层次 简化电压层次并逐步提高配电的电压等级,是国际上的一致趋势。近十年来,中国在简化电压层次方面已取得显著成绩。很多城市已将原有 $220、110、35、10\text{ kV}$ 四级电压精简为 $220、110、10\text{ kV}$ 或 $220、35、10\text{ kV}$ 三级电压,原有的 $3.3、6.6\text{ kV}$ 电压已绝大部分升压为 $10\text{ kV}$ 。国外一些大城市的中压配电电压,正在从 $10、6.6\text{ kV}$ 提高到 $20\text{ kV}$ ,例如法国电力公司(EDF)已作出这一决定,而美国的某些大城市正在研究以 $35\text{ kV}$ 电压进行配电,直接降至低压使用。

高电压深入城市负荷中心 这是各国大城市用电量大幅度增长后的必然趋势。在市区周围建设若干个大容量变电所,将输电电压直接降为较低的配电电压,例如 $500/110\text{ kV}$ 、 $220/20\text{ kV}$ 等。

建设坚强的网络结构 为了扩大配电网内主干线路的互通容量,需要建立各级电压的网架结构,即用统一的大截面导线的线路,紧密连接若干个变电所,形成单环网或双环网,正常时开环运行。这样,在不增加电网短路容量的条件下,既可以简化变电所的主接线方式,有效地增加网内变电所的整体储备容量,又能显著提高供电可靠性。

配电网自动化技术 提高配电网管理工作质量和效率的现代化技术措施。包括:配电网运行监控与数据收集(SCADA)、计算机辅助自动地图绘制管理与设备管理(AM & FM)、计算机辅助营业管理(CSM)、电度计量自动测录(AMR)等。SCADA系统中包括配电网调度自动化的四通(遥测、通信、遥控、遥调)。配电自动化技术的开展,将使配电网的运行管理水平大大提高。目前这项工作正在世界各国继续发展,不断完善。

### 参考书目

Electric Utility Engineering Reference Book.  
Vol. 3: Distribution Systems. Westinghouse Electric Co., 1965

Electric Utility Systems and Practice. 4th ed.  
General Electric Co., 1983

(罗祖鉴 王一字 徐博文)

shupeidian jishu zhanwang

输配电技术展望 (forecast & suggestions on



power transmission and distribution techniques)

输配电规划中的发展方向以及输配电技术领域的新建议。其中有的展望是建议性的或期望性的,也有的是国外正在研究的。主要包括输电联网、特高压输电、多端直流与直流电网、高自然功率线路、六相制与多相制交流输电、灵活的交流输电系统以及配电技术新发展等内容。

**输电联网** 大区电网之间的输电联网方式,在初期可能是以单回输电线路构成,但从中长期发展规划来考虑,要预见到多回路输电联网的可能前景,它又必然会影晌第一回输电联网方式的决策。

多回路输电联网,可以有三种发展模式:①完全交流输电模式,即同步互联;②完全直流输电模式,即非同步互联;③交流与直流并联输电模式,其中又可以根据当时具体情况,分为两种建设顺序:一种是先建直流(属非同步互联),后建交流(即转变为同步互联);另一种是先建交流(从开始即属同步互联),后建直流(仍属同步互联),直流则起控制输送功率、提高稳定极限的作用。

**完全交流输电联网** 也称纯交流互联,是传统的联网方式。其特点是容易变压,远近皆宜,也容易形成网络,有成熟的控制开关设备,容易中途引出变电所供电。交流输电技术已日臻成熟,现已采用各种补偿装置和移相器,可以改善电压质量与无功功率分布,实现潮流控制,以提高输电能力。还采用快速切除故障、快关汽门、电气制动、切机切负荷、快速励磁、串联电容补偿、静止补偿装置、系统稳定器、振荡和失步保护等措施,以提高交流系统的静态和动态稳定性。这些措施虽然使运行比较复杂,但却是行之有效的。

**完全直流输电联网** 也称纯直流互联,现已成为技术成熟、运行可靠的输电联网方式。其特点是互联各网可以非同步运行,直流输电可以大幅度迅速控制功率,以提高交流系统的稳定性,使互联的各网现有的和新建的交流输电线路的输送能力增强,并缩小故障影响范围。完全直流输电联网的另一重要特点是:无论是单回直流或多回直流,都不增加各交流电网的短路电流,不需要更换更大容量的交流断路器,对互联的各网进一步发展极为有利。此外,直流输电还具有远距离大功率输电的特点,以及应用海底电缆输电和直接引进城市的电缆输电所具备的巨大经济效益。(见直流输电)

**交流与直流并联输电联网** 也称交直流并联联网。在多回路输电联网方案中,无论其建设顺序是“先交后直”还是“先直后交”,最重要的是适应当时本网的特点与发展前景,以使两者的优点有选择地得到发挥。从国外交直流并联联网的发展历史分析,多数是“先交后直”以满足中间多负荷的需要,这也是由于当

时直流输电技术还不很成熟。后建的直流输电线路,其目的在于提高已建的交流输电线路的输送能力,性质还属于同步联网,不具备非同步联网的优点。(见交直流输电并联运行)

直流输电技术成熟以后,一般趋势是倾向于“先直后交”。为克服初期的交流联网困难,依靠直流联网先取得联网效益,然后再根据中间负荷发展需要,以交流联网满足中间地区的负荷发展。中国的华东电力系统与华中电力系统联网,率先采取直流输电方式,建葛洲坝至上海直流输电线路,就基于这种考虑。这种输电联网模式,既可以推迟建设交流线路,又可以在交流线路建成后,如有必要与可能时解开运行,转变为纯直流联网运行。

中国输电网发展前景,具备了许多有利条件:直流输电技术已经成熟,非同步联网也取得了经验;500kV输电线路已成为大区电网的主要干线;国外已经建成1150kV特高压输电设施的经验可资借鉴。这些都非常有利于选择大区电网之间的输电联网模式,有利于中国电网发展前景的规划和决策。这些条件在幅员广阔、电力发达的国家中,当时还是不具备的。

**特高压输电** 采用1000kV及以上电压输电的统称。发展特高压输电的主要原因是:①远距离大容量输电,特别是巨型水电站远距离输送大功率;②线路路径的地形限制与线路走廊占地面积的限制;③电力系统的电压等级需要考虑更高一级电压;④限制电力系统短路电流;⑤减少输电损失。

按照各级电压等级之间的倍增规律,中国输电网在500kV之上,即应采用1000kV级电压。国外的规划和发展经验,也都是如此发展。

一般认为:输送容量为5000~10000MW,输送距离为1000~1500km,即应考虑采用1000kV级电压。1200kV线路走廊宽度约为90m,如以输送10000MW计算,采用550kV线路需要6条单回线路,其走廊宽度则需228m。采用550kV线路的输电功率损失也比采用1200kV的要高5倍。

特高压输电与现有电网的连接方式,初期可能是点对点的输电主干线,以后逐步发展成500kV的上一级电网。有的国家还明确规划,在1000kV形成可靠的坚强电网之后,按区域解开500kV电网,以避免高低压形成电磁环网,并可减少短路电流。

国外对发展特高压和超高压输电,有以下几点共同认识:①大约每隔20年需要增加一个新的高一级的输电电压等级;②发展特高压输电,一般经验是需要提前20年左右着手准备;③特高压输电工程的研究工作,一般分为三个阶段进行,即特高电压的基本性能研究、特高压设备研制及实验基地建设,特高压工程的电

气与机械研究以及技术经济比较。

特高压输电技术的科研问题,一般包括:①过电压与绝缘配合;②电晕影响;③感应电压及电流;④研制变压器与电抗器;⑤研制断路器;⑥研制避雷器;⑦测量互感器等的研制;⑧输电线路的电气设计;⑨输电线路的机械与力学设计;⑩变电所的设计。

世界上第一条特高压输电工程,现已建成。苏联把西伯利亚中部与哈萨克斯坦的电网相联,采用 1150 kV 电压,其输电线路长为 1170 km。它的运行实践为特高压输电开辟了道路。

**多端直流与直流电网** 直流输电系统现多作为远距离大容量的输电主干线,或者兼顾作两个交流电网之间的联网线路,其性质都是属于二端直流输电系统。它的构成也只包括两端各有一个换流站,中间一条直流输电线路。尽管二端直流系统所起的作用极为显著,但在电力系统的整体结构上,还只是交流大系统中的一个重要环节。

交流电力系统和直流输电都在不断发展,终将出现多端直流输电系统,成为大电力系统中的组成部分——直流电网。例如三个交流电网之间采用直流线路互联,用三个换流站组成三端直流系统。

三端直流系统,按照三个换流站的连接方式,可分为并联型与串联型两种。并联型的各换流站是通过直流线路按并联方式连接,以同一直流电压运行,以改变各换流站的电流来实现各换流站之间的功率分配。串联型的各换流站之间的功率分配,主要是靠改变换流器的直流电压来实现。(见直流输电)

发展多端直流系统,以至形成直流电网,要到直流断路器的研制能够达到实用与经济的阶段,方可完善与成熟。目前直流断路器尚在试制,尚未进入正式生产,多端直流系统中的某一换流站的投入或退出运行是用自动隔离开关与调节换流器的配合操作来完成。切除某段故障线路,也是靠调节换流器将整个直流电网电压下降到零时实现故障段线路的切除,然后再自动起动恢复运行。一般认为,这段操作过程所需时间,可以做到与交流系统重合闸所需时间差不多。

形成直流电网的前景,目前还处在研究与发展阶段。

**高自然功率线路** 以增加分裂导线的子导线根数,加大分裂间距,缩短相间距离,从而降低线路的波阻抗,提高自然功率的一种紧凑型线路,也统称紧凑型输电线路。

初期研究紧凑型输电线路的目的,是节约线路走廊占地面积,也能取得提高自然功率 20%~30%的效果。其线路结构虽较复杂,但能节约走廊占地面积,常被因地制宜的应用,特别是在出线走廊地段。现阶段主

要是应用于高压线路深入引进城市,以简化电压层次。紧凑型输电线路的主要问题是线路造价、运行可靠性以及带电作业。近期又设计研究了以提高自然功率为目的的高自然功率紧凑型线路,特别着重分裂导线的优化布置,自然功率的设计值可达常规线路的 1.6 倍左右,因而引起各方面的重视,也引起不少争议。

高自然功率线路的结构更为复杂,这也是争议的主要原因。它的应用条件,首先是在本系统中确有必要与可能输送高于常规线路自然功率的输送容量,因为输电容量不仅决定于线路本身,而且受电网条件所限。此外还需要与其他方案做技术经济比较,如提高电压等级、采用双回输电线路等,在技术经济比较以及近期与长期效益的权衡之后,方能做出选择。

高自然功率线路本身,还有若干尚待深入研究的课题。例如:雷电闪络,带电作业,新型杆塔结构的可靠性,以及子导线根数增加导致对地场强增高的环境影响等。

**六相制与多相制交流输电** 对应于交流的三相制而演变出来的六相制、十二相等,统称多相制,是一种相当新颖的交流输电体制。世界上许多电力企业和研究机构,都在研究这种体制的技术经济效益,率先从改造现有线路的观点出发,希望引伸到设计新的线路工程。

三相制的相对相电压是相对地电压  $\sqrt{3}$  倍,因而相对相电压称为系统电压。六相制的相对相电压,已等于相对地电压。从十二相制开始,相对相电压变为小于相对地电压。因而多相制的系统电压需作重新规定。一般认为多相制的系统电压,应定义为相对地电压。因为由三相制而演变出来的多相制,其相对地电压不变。但对这种定义方法,现在的电力系统及输配电工作者颇不习惯。另一种定义方法是:多相制的系统电压可按照其对应的三相制的相对相电压,以利于多相制直接与三相制电网相连接,也适应于由双回三相制的现有线路改造为对应的六相制线路。这种定义方法比较现实也符合习惯。例如,把原有的三相制双回 138kV 线路改造为六相制单回线路,即称为系统电压为 138 kV 的六相制线路。它在途中可以直接与三相 138kV 电网连接供电,不需要经过六相制变电所。

三相制与多相制的相对相和相对地电压对照见下表。

相对地电压	相对相(邻相)电压			
	三相制	六相制	十二相制	二十四相制
80	138	80	41	21
133	230	133	69	35

续表

额定电压	额定相(线)电压			
	三相制	六相制	十二相制	二十四相制
199	345	199	103	52
289	500	289	150	75
442	765	442	229	115

多相制输电的特点是：①相同的线路走廊和占地面积，多相制的输送容量可以增大。如将原有三相138kV双回路(同塔)改建为单回六相制线路，可以提高输送容量73.2%。②多相制输电特别适应于线路路径受地理限制的地区。③由于多相制线路的输送容量较大，有可能推迟或不引用更高一级电压。④与三相制相比，多相制并不需要更高的绝缘水平。⑤三相制设备的制造经验，完全可以应用于六相制或其它多相制。⑥多相制途中还可以向三相制电网供电，不需经过多相制变电所。

美国对多相制交流输电的研究，首先是从理论计算入手，认为：①计算三相制的系统阻抗，所用的对称分量法，可以扩展到多相制；②线路热负荷将随相数的增加而减小，而自然功率将随相数的增加而增大，但较缓慢；③多相制线路的不平衡电流与三相制线路相似，或者更小些；④导线表面电场强度将随相数的增加而降低，多相制线路的电晕程度减弱，可听噪声与无线电噪声均将减弱；⑤地面电场强度随相数的增加而增大，成为设计多相制线路特别是超高压线路的重要问题，在线下增设屏蔽导线，可使地面电场减小，是改造现有线路的一种措施。

这些分析研究的结论，初步说明六相制交流输电的可行性，而将六相制进一步应用于建设新线路，则还有待于真型实验线路所提供的实际资料，从而确定其经济效益。

**灵活的交流输电系统** 应用电力电子学的最新成就以及现代自动化控制技术，实现对常规的交流输电系统的输电功率潮流的灵活控制，以极大地提高现有的输电线路的输送能力，提高电力系统的稳定水平。它是一种灵活控制的新型交流系统。

这种灵活控制的交流输电系统的关键问题，是在电子技术已进入高电压、大功率的强电领域时代，研制固态电子开关器件，以取代传统的机电型断路器。这种高电压、大功率的电子开关器件，配合其他电容、电感、电阻器件，以及自动装置等，将可以实现电力系统的电压、相角、参数、潮流的快速灵活控制。

新型的固态电子开关，其开断时间极短，远非机电型断路器所能及，且连续开断次数几乎是不受限制的。所以，将它应用于高电压、大功率以及一系列以它为主

的控制调节装置与相应的自动控制系统，将使常规的、传统的电力系统能够快速、灵活地控制潮流与优化调度。

研究发展灵活的交流输电系统的前景，将使交流电力系统取得很多重大的技术经济效益：①以快速开断技术提高电力系统稳定，从而提高输电线路的输送容量；②改变由电网结构决定电网功率潮流的不理想状态，以灵活控制技术实现优化潮流分布；③以电力电子技术逐步改造现有机电型控制设备，发挥现有电网设施的潜力，开辟电网建设发展的新途径。

**配电技术新发展** 以系统的观点展望配电技术的发展方向，主要是：①采用高效率、低能耗的设备；②简化电压层次，逐步提高配电电压；③配电变电所向小型化、紧凑化、自动化、户内化、无人值班方向发展；④高电压配电深入城市负荷中心；⑤建设坚强的网络结构；⑥广泛采用配电网自动化技术。(见输配电技术经济)

(徐博文)

shupeidian jianshi

**输配电简史** (brief history of power transmission and distribution)

输配电的历史，是从低压直流配电方式开始，以直流发电机电压的直配线供电，但不久即为交流配电方式所取代。电力变压器的发明，克服了提高发电机电压的困难，开始用升压方式供电，从而开拓了高电压输配电的技术领域，使发电厂厂址不局限于在电力负荷中心地带。此后，输配电的发展史总起来说就是电压逐步提高的历史。

**国外输配电发展简史** 法国在1881年首先以直流发电机电压直接送出供电，从而开始了低压直流供电系统的实际应用。1886年，美国首先发明了交流电力变压器，并在麻省制造成功。1888年，俄国发明了三相交流发电机，又于1891年建成了三相交流13.8kV线路及其升压与降压变压器。从此确立了三相交流供电方式。

输配电电压得以逐步提高，是线路和设备的技术进步的硕果。1898年，美国建成33kV线路120km，采用针式绝缘子。1906年，美国制成悬式绝缘子，输电电压才得以提高。1908年，美国建成了110kV线路。电压再进一步提高，导线就受到电晕的限制，电晕的临界电压与导线直径成比例增长。1910~1914年，美、苏两国都研制了钢芯铝绞线以扩大导线直径，把输电电压提高到150kV。在研究220kV电压时，发现了绝缘子串电压分布不均的现象，从而又设计了均压环应用于220kV及以上的线路。美国于1923年建成230kV输电线路。1937年美国又建成287kV输电线

路,从波得尔水电站至洛杉矶,全长 455 km。

欧美国家在 330 kV 及以上的超高压输电设计中,多采用分裂导线以控制导线的电位梯度,避免产生强烈的无线电干扰,并减少电晕损失。对远距离输电,还采用了串联电容补偿与并联电抗补偿以及分段开关站等措施。1952 年瑞典建成 380 kV 线路。1954 年美国建成 345 kV 线路。1956 年苏联建成 400 kV 线路,到 1959 年升压为 500 kV 线路。1965 年加拿大建成 735 kV 线路。1967 年苏联建成 750 kV 线路。1969 年美国建成 765 kV 线路。到 1985 年,苏联建成 1150 kV 输电线路。从此跨入了特高压输电的新时代。

在交流架空输电线路高速发展之际,高压直流输电线路也开始有所发展。(见直流输电)

中国输配电发展史 1949 年前,中国输配电的发展比较迟缓,电压等级繁多,级差偏小,各行其是,未建立全国统一的电压标准。一部分大城市采用 22 kV 及 33 kV 的电压,东北地区多用 44 kV 及 66 kV 电压。城市之间,平(北平)、津(天津)、唐(唐山)采用 77 kV,东北地区采用 154 kV 和 220 kV。各级电压最早建成的线路是:1908 年建成 22 kV 石龙坝水电站至昆明线路;1921 年建成 33 kV 石景山发电厂至北京线路;1933 年建成 44 kV 抚顺电厂出线;1934 年建成 66 kV 延边至老头沟线路;1935 年建成 154 kV 抚顺电厂至鞍山线路;1941 年建成 77 kV 天津—厂至塘沽线路;1943 年建成 110 kV 镜泊湖水电站至延边线路;1943 年建成 220 kV 水丰水电站至大连线路。

1949 年以后,立即着手逐步进行统一电压标准的工作。首先明确把北京、天津、唐山的 77 kV 和东北地区的 154 kV 消弧线圈接地系统,分别改为 110 kV 和 220 kV 的直接接地系统。这在线路绝缘方面没有很大困难,从而统一了输电电压为 220/110 kV 两级,也为推行 110/35/10 kV 配电电压系列创造了有利条件。在此基础上,确立了以后的 GB156《额定电压》。

1952 年,中国开始自己设计具有自己技术特点的输电线路。首先为京津唐电力系统实施 77 kV 升压计划而分段建设的 110 kV 输电线路,开始采用工厂预制钢筋混凝土空心锥形电杆(简称混凝土杆或水泥杆)以代替传统的木杆,为以后的 110 kV 线路的建设开辟了新途径。通过 1956 年的混凝土电杆标准设计,得到大面积推广,其中又采用了钢筋预应力技术与分段连接,以及钢圈焊接和法兰连接方法的钢筋混凝土空心电杆,在山区和更高电压等级推广应用,成为有中国特色的输电线路电杆设计。

中国自己设计的 220 kV 铁塔线路,是从 1954 年建成的丰满—李石寨输电线路开始的。它与以后继续兴建的辽宁电厂至李石寨,阜新电厂至青堆子等 220

kV 线路,组成当时东北电力系统的 220 kV 网架的主要部分。

华东电力系统在 1958 年建成望亭电厂至上海的 220 kV 输电线路。1960 年建成新安江水电站至杭州的 220 kV 输电线路,并延伸至上海。1962 年初步形成了华东电力系统的 220 kV 网架的主要部分。在上杭线上,中国首次采用自己设计、自己研制的 220 kV 串联电容补偿站和单相重合闸装置,经多年运行,积累了大量实践经验,为以后建设的远距离大容量超高压输电线路创造了有利条件。

中国的第一条超高压输电线路,是 1972 年建成的 330 kV 刘家峡—关中输电线路。全长 534 km,输送功率可达 420 MW,是当时最长的线路。它是中国自己设计、自己制造设备、自己施工安装的,采用了 330 kV 串联电容补偿装置、330 kV 并联电抗器、单相重合闸、双分裂导线等技术措施。这条输电线路的建成,使陕甘青的电网骨架初步形成。

20 世纪 70 年代,国际上认同了在 220 kV 电压之上最好发展 500 kV 电压等级。当时中国的大区电力系统已多数形成 220 kV 电网,因而开展了 500 kV 超高压输电的建设。在华中电网,1981 年建成了 500 kV 平顶山—武昌输电线路工程,全长 595 km;1983 年相继建成葛武(葛洲坝—武昌)和葛双(葛洲坝—双河)两条 500 kV 输电线路,组成华中的 500 kV 电网网架,使河南火电与湖北水电相互调节。此后,华北电力系统与东北电力系统也都相继兴建起 500 kV 输电网。

高压直流输电,是大型电力系统中的一个重要环节。中国在 1987 年建成自行设计、全部国产设备的 ±100 kV 舟山直流输电工程。它是从浙江电网跨海向舟山群岛供电,包括宁波整流站、舟山逆变站、42 km 直流架空线路和 12 km 海底电缆,它是利用直流输电向一个小系统连接供电的典型实例,也是取得设计、制造、施工、安装、调试和运行经验的实验工程。

中国的超高压大容量远距离直流输电工程,是 ±500 kV 葛洲坝—上海直流输电工程。它是从葛洲坝水电站的宋家坝换流站,以架空的直流输电线路与上海的南桥换流站相连接,全长 1080 km,单极容量 600 MW,双极容量 1200 MW,1989 年单极 600 MW 投入运行,1990 年双极 1200 MW 全部投入运行。葛上直流输电工程,首次将华中与华东两大区电力系统连接起来,以获得联网效益,并将葛洲坝水电的季节性电能东送以充分利用,在华中电力系统装机有余量时还可将电能送往上海。

中国已确定:在 20 世纪内将以发展 500 kV 交流输电为主,辅以 ±500 kV 直流输电,以满足中国电力发展的需要。交流更高一级电压,将根据需要在 2000

年以后发展到 1150 kV 特高压输电。

#### 参考书目

黄畴. 电力技术发展史简编. 北京: 水利电力出版社, 1986

水利电力部编. 中国电力工业. 北京: 水利电力出版社, 1988

(徐博文)

shupeidian sheshi yu huanjing xietiao

**输配电设施与环境协调** (coordinations of power network facilities and their environments)

输配电设施在规划设计与建设运行中对所处环境的协调配合以及与附近景观的和谐一致。输配电设施与环境的协调一般可划分为三类, 即规划设计的协调、对所处环境的影响、与附近景观的和谐。

**规划设计的协调** 输配电设施包括各级电压的线路和变电所, 遍布于城市内外, 它们与环境协调问题的重点是在城市范围之内。中国的《城市规划法》规定: 电力网规划要由供电部门与城市规划部门共同负责编制, 在城市规划的总体规划、分区规划及详细规划的分层次编制时都必须紧密结合, 并将电力网规划纳入城市规划。这是互相协调的主要原则。

中国依据原能源部与建设部颁发的《城市电力网规划设计导则》的规定, 输电线路和高压配电线路及其变电所的规划设计与城市规划的协调, 主要是线路走廊与所址位置的确定和预留; 中压、低压配电线的协调, 主要是与其它公共设施的统一规划和安排。(见城市配电网)

**全屋内型变电所** 在大城市的市中心区及较繁华地区, 高压配电变电所 (110、63、35 kV) 多建成全屋内型变电所, 主变压器也建在屋内, 也可以将电气设备的建筑物与其他建筑物 (如办公楼、写字间等) 混合建设, 电气设备布置在建筑物底部一、二层, 高层则与其他建筑。同时, 建筑高度与外部造型、色彩需讲求与周围环境协调和谐。全屋内型变电所要十分注意由于主变压器、电抗器、通风机等所产生的噪声, 必须符合中国国家标准的相关规定。

**地下变电所** 高压配电变电所 (110、63、35 kV) 在市区内的特殊地区占地极困难时, 也可采用地下变电所。一般有三种类型: ①与高层建筑同时建设。高层建筑楼层高, 电力负荷较大, 变电所即建在建筑物的地下部分, 一般深度约为 0~20 m 左右, 内部分隔成 3~4 层, 如建在北京国贸中心的地下变电所。②将变电所建在公共场所 (如公园、广场等) 地下, 待变电所建成后, 其上可覆土绿化, 不影响原来景观。如上海的人民广场及锦江花园的地下变电所。③与地下用电

设施同时建设变电所, 供给地下设施的用电。如北京的地下铁道, 其 35kV 电源变电所即与地铁车站同时建设, 形成一体。

全屋内型变电所及地下变电所, 最适宜采用气体绝缘金属封闭电器, 亦可采用小型化配电装置, 以减少建筑面积。

**市内配电线路** 高压配电线路 (110、63、35kV) 在进入市区以后, 人口稠密, 多不易取得线路专用走廊, 往往不得不架设在道路的两侧, 或在道路中央绿化带内穿行。因此, 市内高压配电线路须缩小线路档距, 减小导线风偏, 保证与周围建筑物的安全距离, 同时可采用钢管型杆塔或窄基铁塔, 以减少占地面积。

市区内的中压与低压配电 (10kV 与 380V) 线路一般是沿街道架设, 按一般城市规划规定, 道路一侧为电力线路, 另一侧为通信线路。在市区设计线路必须注意: ①要与建筑物保持安全距离; ②缩短档距, 提高安全系数; ③力争不设拉线, 便利行人; ④与人行道树木的绿化协调, 或采用荫浓而主干低矮的树种, 或提高电杆高度, 或采用绝缘导线, 以解决树线矛盾。此外, 一杆多用方式 (如电力线路与路灯设施合杆、电力线路与电车行车线路合杆) 可以改变道路两侧电杆林立的状态, 有利于美化市容。

电力电缆线路在城市内的应用不断增加, 有许多优越性。它减少了在地面上的协调问题。但与地下管线及建筑物基础之间的协调, 以及挖掘路面、影响市内交通等矛盾, 却异常突出。一般必须在城市规划中先期考虑, 尤其是采用隧道或排管的电缆安装方式, 更要预先完成电缆线路设计。

**对所处环境的影响** 输配电设施对环境的影响, 一般包括环境电磁影响、噪声影响和防火。

**环境电磁影响** 高压、超高压输电线路及其变电所会产生工频电场、工频磁场以及因电晕放电而产生的高频电磁场。高压、超高压输电线路所产生的电场与磁场, 主要是影响线路经过的附近环境, 也对各种通信设施有一定的干扰影响。电晕放电而产生的高频电磁场, 除影响线路沿线环境而外, 更集中地影响变电所及其附近的环境。(见输配电电磁与环境的影响)

**噪声影响** 除超高压和高压设备产生电晕放电伴随可听噪声外, 一般变电所中还有普遍存在的噪声, 例如主变压器、电抗器的铁磁噪声, 油泵、风机的振动噪声以及高压断路器跳合闸的机械撞击噪声等等, 在城市配电变电所中应予以十分重视 (见配电变电所噪声)。努力减小噪声, 以创造宁静的生活环境, 在生活区更为重要。

**防火** 变电所中装有大量带油设备, 要十分注意防火设计, 特别是全屋内型变电所、地下变电所以及建

于其他建筑物内的变电所,更要重视防火问题。(见变电所防火与防爆)

**与附近景观的和谐** 输配电设施与景观和谐,既是规划设计的协调,也是对美化城市的责任。

**建筑物与附近景观的和谐** 变电所的建筑物与相邻建筑物在形体和色彩上要配合,尽可能使之成为建筑群中的和谐的一员。全屋内型变电所在设计中一般都要考虑与相邻建筑物的协调。

**箱式变电站** 为了美化环境,在公园、道边绿化地带以及某些特定场所常常采用箱式变电站。它的最大特点是将配电装置及电力变压器均布置在箱内,全部在制造厂组装调试合格,成套提供。由于它是全封闭式的,以金属或非金属材料制成的箱体作为外壳,可以按照环境景观的色彩喷涂和谐色泽的涂料,因而它是与环境景观协调最简便的方式。根据与环境协调的需要,箱式变电站的进出线路可以是架空线路,也可以是电缆线路。

**架空电力电缆** 对穿过森林和大片树木很有利,它可以不伤树木,不影响森林景观。(见架空电缆)

(朱保哲 徐博文)

shupeidianwang de wugong buchang yu dianya tiaozheng

**输电网的无功补偿与电压调整** (reactive power compensation & voltage regulation in transmission & distribution systems)

将电抗器、电容器、同步调相机和调压变压器等装置接入输配电网中,以起到改善功率因数、调整电压以及补偿参数等作用。输配电网无功补偿的基本原则是:按电压分层,按电网分区,就地平衡,以避免无功功率的远距离输送,避免占用线路输送容量,避免增加有功损耗。

**输电网的无功补偿与电压调整** 以参数补偿和电压支撑为主。由于输电网一般无直供负载,一般不为调压目的而设置无功补偿装置。参数补偿多用于较长距离的输电线路,有串联补偿(又称纵补偿)与并联补偿(又称横补偿)之分。电压支撑则多用于与地区受电网络连接的输电网的中枢点。

**并联电抗器补偿** 并联电抗器是超高压长距离输电线路的常用补偿设备,用以补偿输电线路的对地电容所产生的充电功率,以抑制工频过电压。并联电抗器的容量按线路长度和过电压限制水平选择,其补偿度(电抗器容量与线路充电功率之比)国外统计大多为70%~85%,个别为65%,一般不低于60%。并联电抗器一般设置在线路两端,且常不设断路器。

**中性点小阻抗接地补偿** 为限制潜供电流,提高长线路单相重合闸的成功率,在并联电抗器中性点接

入小阻抗补偿。小阻抗的电抗分量,用于补偿线路的相间电容,电阻分量用于补偿线路的相间互感。小阻抗的数值由限制潜供电流的水平和重合闸的要求决定。接有小阻抗的并联电抗器的中性点绝缘水平,应满足装设小阻抗的绝缘要求。(见潜供电弧)

**串联电容补偿** 串联电容用来补偿输电线路的感抗,起到缩短电气距离提高稳定性水平和线路的输电容量的作用。串联电容器组多为串、并联组合而成,并联支数由线路输送容量而定,串联个数则由所需的串联电容补偿度(串联电容的容抗与所补偿的线路感抗之比)而定。串联电容补偿度一般在50%以下,不宜过高,以免引起系统的次同步谐振。

输电网中因阻抗不均一而造成环流时,也可用串联电容来补偿。日本在110 kV环网中就使用了串联电容补偿。

**中间同步或静止补偿** 在远距离输电线路中间装设同步调相机或静止补偿装置,利用这些装置的无功调节能力,在线路轻载时吸收线路充电功率,限制电压升高;在线路重载时发出无功功率,以补偿线路的无功损耗,支持电压水平,从而提高线路的输送容量。中间同步或静止补偿通常设在线路中点,若设在线路一端,则调节作用消失。(见远距离输电)

**输电网的电压支撑与调压** 输电网与受电地区的低一级电压的电网相联的枢纽点,常设置有载调压变压器或有相当调节与控制能力的无功补偿装置,或者二者都有,以实行中枢点调压,使受电电网的运行不受或少受输电网因潮流变化或其他原因形成的电压波动的影响,并在输电网发生事故时起支撑电压的作用,防止因电网电压剧烈波动而扩大事故。

电压支撑能力的强弱,除与补偿方法和补偿容量大小有关外,更与补偿装置的调节控制能力和响应速度有关。并联电容器虽是常用而价廉的补偿设备,但其无功出力在电压下降时将按电压的平方值下降,不利于支撑电压。大量装设并联电容器补偿反而有助长电网电压崩溃事故发生的可能。采用同步调相机和静止无功补偿装置辅以适当的调节控制,是比较理想的支撑电压的无功补偿设备。近年来,国内外均注重静止补偿装置的应用。

**配电网的无功补偿与电压调整** 以相位补偿和保证用户用电电压质量为主。

**相位补偿** 亦称功率因数补偿。用电电器多为电磁结构,需要大量的励磁功率,致使用户的功率因数均为滞相且较低,一般约为0.7左右。励磁功率——滞相的无功功率在配电网中流动,不仅占用配电网容量,造成不必要的损耗,而且导致用户电压降低。相位补偿是以进相的无功补偿设备(如并联电容器)就近供给用户

或配电网所需要的滞相无功功率，减少在配电网中流动的无功功率，降低网损，改善电压质量。中国对大电力用户要求安装无功补偿装置，补偿后的功率因数不得低于滞相 0.9。

电压调整 为保证用电电器有良好的工作电压，避免受配电网运行电压波动的影响，配电网需要进行电压调整。配电网电压调整的措施包括：中心调压，调压变压器调压和无功补偿调压。

(1) 利用地区发电厂或枢纽变电所进行中心调压。这种措施简单而经济方便，但它只能改变整个供电地区的电压水平，不能改善电压分布。当供电地区的地域比较广阔、供电距离长短悬殊时，中心调压措施往往不能兼顾全区，有顾此失彼的欠缺。

(2) 调压变压器调压。可弥补中心调压方式的不足，进行局部调压。调压变压器有有载调压变压器、串联升压器和感应调压器三种。有载调压变压器与感应调压器一般用于特定负荷点，串联升压器则用于供电线路。

调压变压器的调压作用是靠改变电力网的无功潮流来实现的。它本身不仅不产生无功功率，而且还因本身励磁的需要而消耗无功功率。当电网的无功电源不足时，调压变压器的调压效果不显著。相反地，若调压变压器装设过多，将加重配电网的无功功率消耗，拉低全网电压水平，增大网损，降低并联电容器的无功出力，严重时可能造成恶性循环的趋向。

(3) 无功补偿调压。由于增加了电力网的无功电源，能起到改善全网电压水平的作用。装设于变电所内的无功补偿装置，还可采用分组投切的办法，对供电地区实行中心调压。

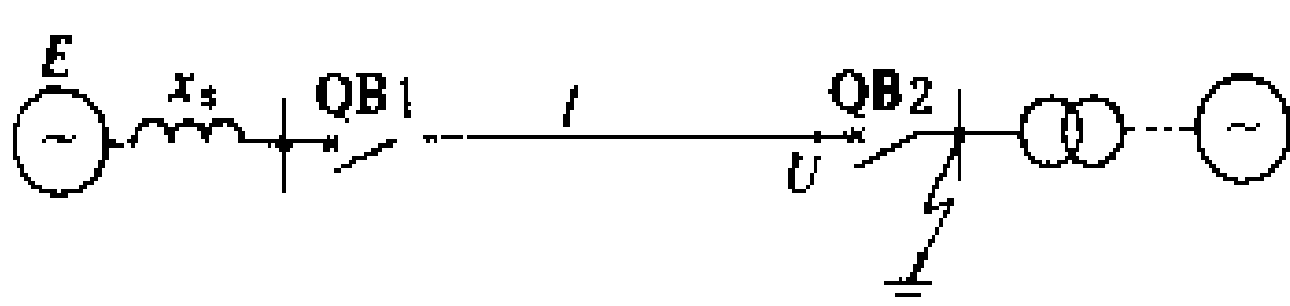
串联电容补偿，可用于配电网中进行局部调压。距离较长的重载线路，使用串联电容补偿，效果较好。因其调压作用是由线路滞相电流流过串联电容而产生的电压升高来实现的，故线路负载愈重，功率因数愈低，串联电容补偿调压的作用愈显著。这种调压作用随线路负载的变化而变化，具有自行调节的功能。串联电容器所产生的无功功率，也增加了电力网的无功电源，可改善电力网的电压水平。串联电容能使线路受端的电动机产生自励磁现象，需在设计、使用时，预先防止。

参考书目  
曹荣江，配电网中的串联补偿装置，北京：中国工业出版社，1964  
(费翔群)

shuairuhe guodianya  
甩负荷过电压 (load rejection overvoltage)  
电力系统中由于甩掉负荷和发电机加速旋转而产生

生的工频过电压。

在长线路传输大功率的情况下，首端发电机的等效电动势  $E$  高于额定电压。当由于故障等原因，使线路首端断路器 QB1 开断后(见图)，负荷被甩掉，而原动机调速器和发电机自动调压装置因有惯性在一开始起不到调节作用，母线电压从额定电压上升到  $E$ ，这是形成甩负荷过电压的一个因素。此外，由于空载发电机继续受到驱动而加速旋转，汽轮发电机在短时间内的转速可增至原来的 1.10~1.15 倍，水轮发电机转速可增至原转速的 1.30 倍以上，电源电动势和母线电压受此影响而继续增大，这是形成甩负荷过电压的另一个因素。



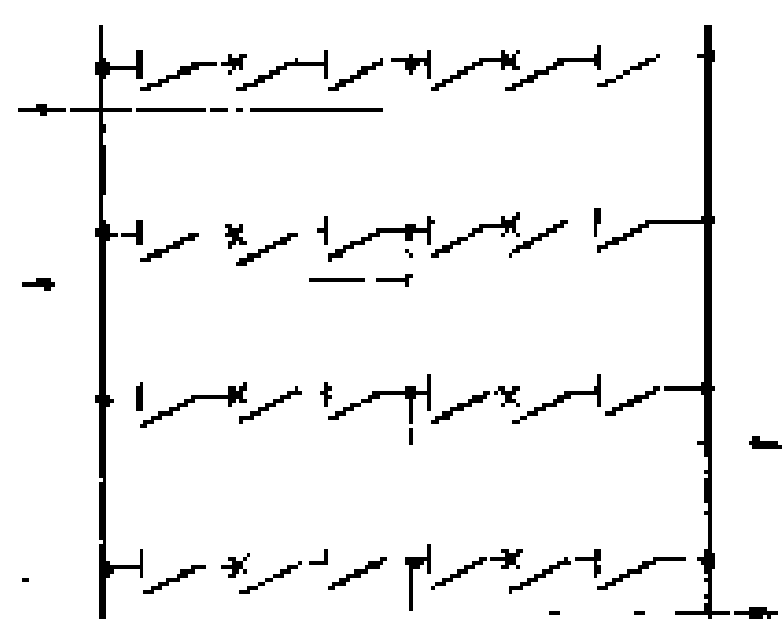
断路器 QB1 或 QB2 分闸后的甩负荷接线图

如果线路末端断路器 QB2 分闸，由于长线路的电容效应，线路电压进一步升高，同时，由于频率的增大，长线路电容效应将更为强烈，使得线路电压升得更高。

甩负荷后，系统中发电机转速和线路电压约在数秒钟内到达最大值，线路最高电压可达额定值的 1.5~1.6 倍，然后由于原动机的调速器和发电机的自动调压装置的作用，首端母线电压将逐渐下降到额定值。  
(陈维贤)

shuangduanluqi jiejian  
双断路器接线 (double breakers configuration) 每一个线路或主变压器回路采用两台断路器分别接入两组母线的电气主接线。见图。其优点是供电可靠性高，一组母线检修或故障时，不影响回路供电；任一台断路器检修或故障时，可通过与它并联的另一台断路器继续供电。其缺点是断路器数量较多，投资较大，占地也较多。

有的国家 330kV 及以上的变电所在回路不多而可靠性要求很高的情况下，有时采用这种接线。中国尚未采用这种接线。



双断路器接线

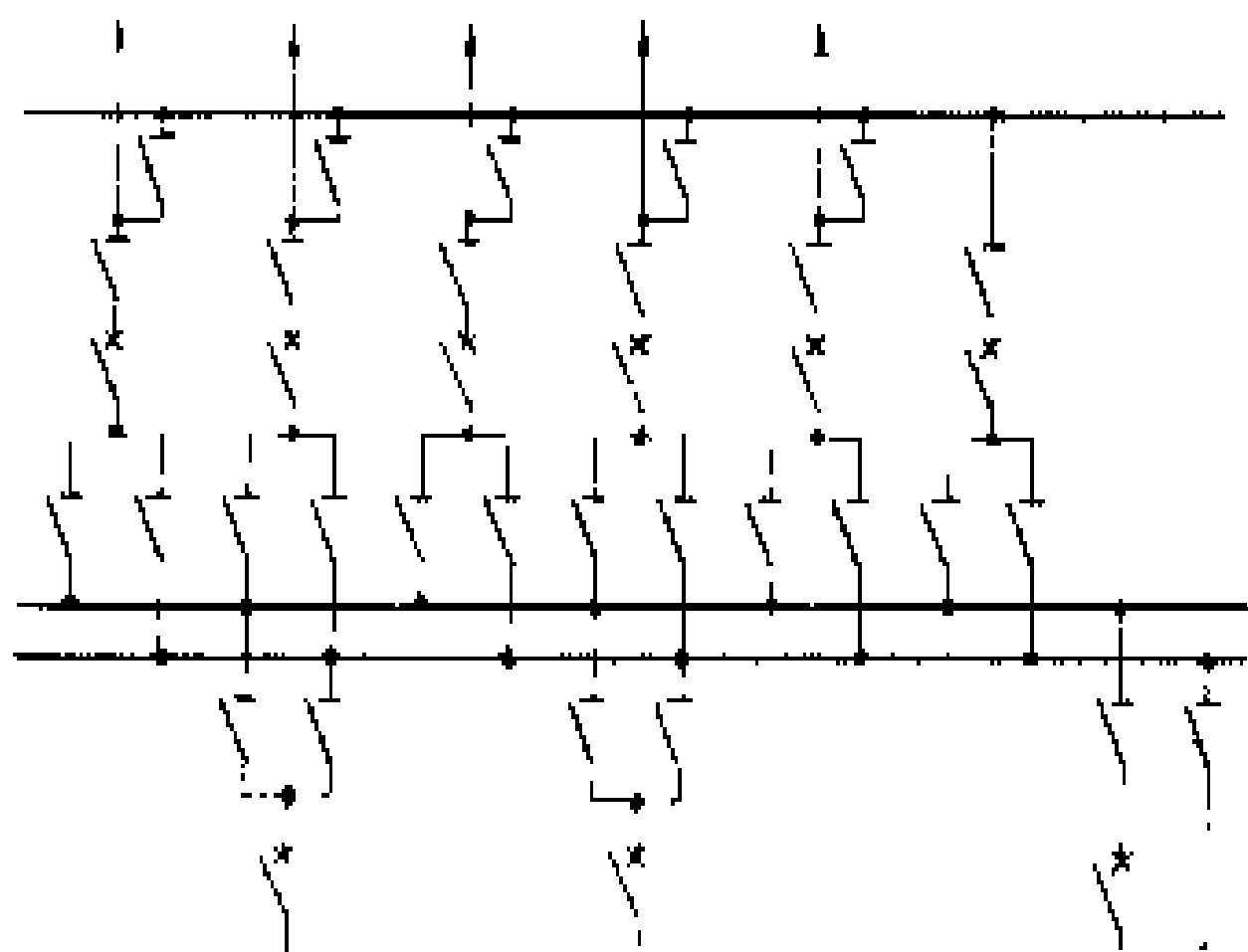
此外，有的国家考虑到主变压器故障率相对较低，采用了将主变压器回路直接接入母线而每个线路回路仍然采用双断路器分别接入双母线的接线。它是双断路器接线的派生接线，称为变压器-母线

组接线。1965 年苏联将这种接线作为 330kV 及以上的变电所的典型接线之一。

(蓝增珏)

shuangmuxian dai panglu muxian jiejian

**双母线带旁路母线接线** (double - bus with auxiliary bus configuration) 由变压器回路、线路、两组主母线和一组旁路母线组成的电气主接线。当线路或变压器回路断路器进行定期检修时,可以使该回路通过旁路隔离开关与旁路母线相连,再通过旁路断路器接到相应的主母线上,继续正常运行。旁路母线平时是处于不带电的备用状态(见图)。



双母线带旁路母线接线

在这种接线中,有时装设专用的旁路断路器,有时利用母联断路器来兼作旁路断路器,或利用旁路断路器兼作母联断路器。例如,当利用母联断路器兼作旁路断路器时,是将母联断路器的一侧通过两组隔离开关分别接到一组主母线和旁路母线上,母联断路器的另一侧也通过一组隔离开关接到另一组主母线上。当利用旁路断路器兼作母联断路器时,则需要在旁路母线和一组主母线之间增加装设有隔离开关的跨条,此时旁路母线将处于带电的状态。利用一台断路器兼作旁路断路器和母联断路器,虽然可以节省一台断路器的投资,但当线路检修时,双母线有可能变成单母线运行,降低了供电的可靠性。

专用旁路断路器接线是将该断路器的一侧通过一组隔离开关接到旁路母线上,另一侧通过两组隔离开关分别接到两组主母线上。世界各国都是当线路较多且重要时才装设专用旁路断路器。在中国,装设专用旁路断路器的条件是:①220 kV 线路回路数为四回及以上;②110 kV 线路回路数为六回及以上;③35 kV 线路回路数为八回及以上。

旁路母线是为检修线路断路器而设的,因此在下列情况下可以不设旁路母线:①当电力网具备允许断路器停电检修时;②当采用可靠性高、检修周期长的六氟化硫断路器或气体绝缘金属封闭电器时;③当断

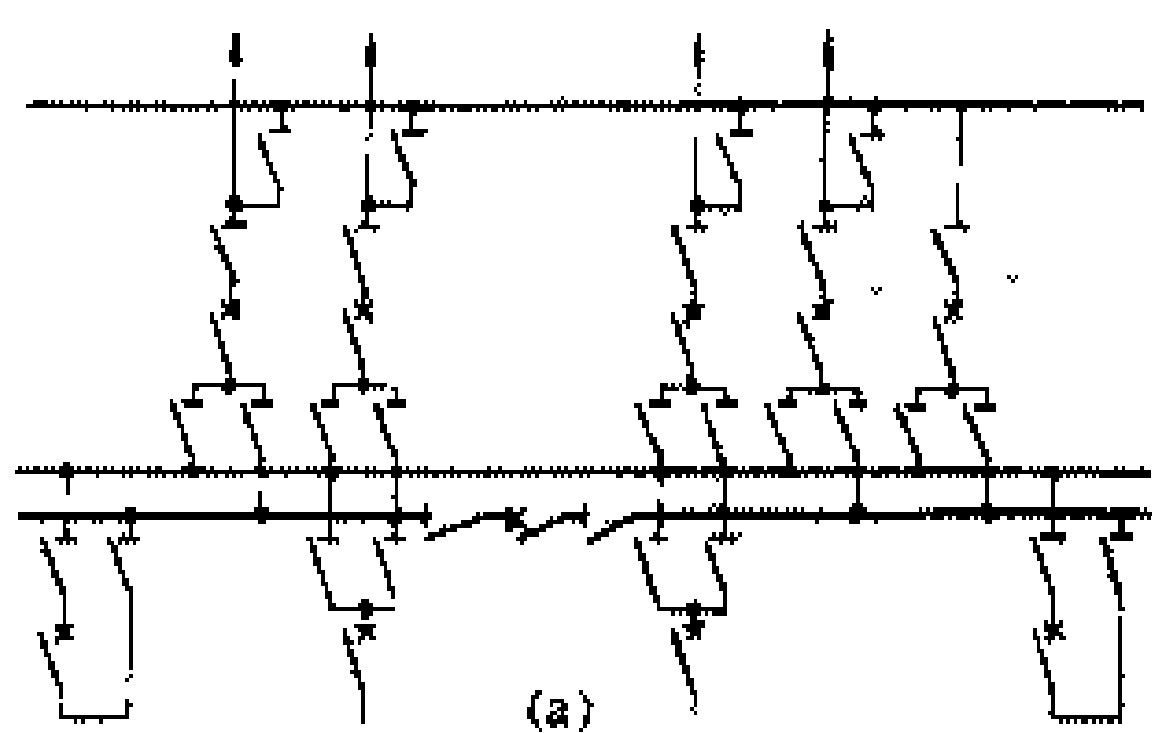
路器可以被迅速置换时。

(刘元皋)

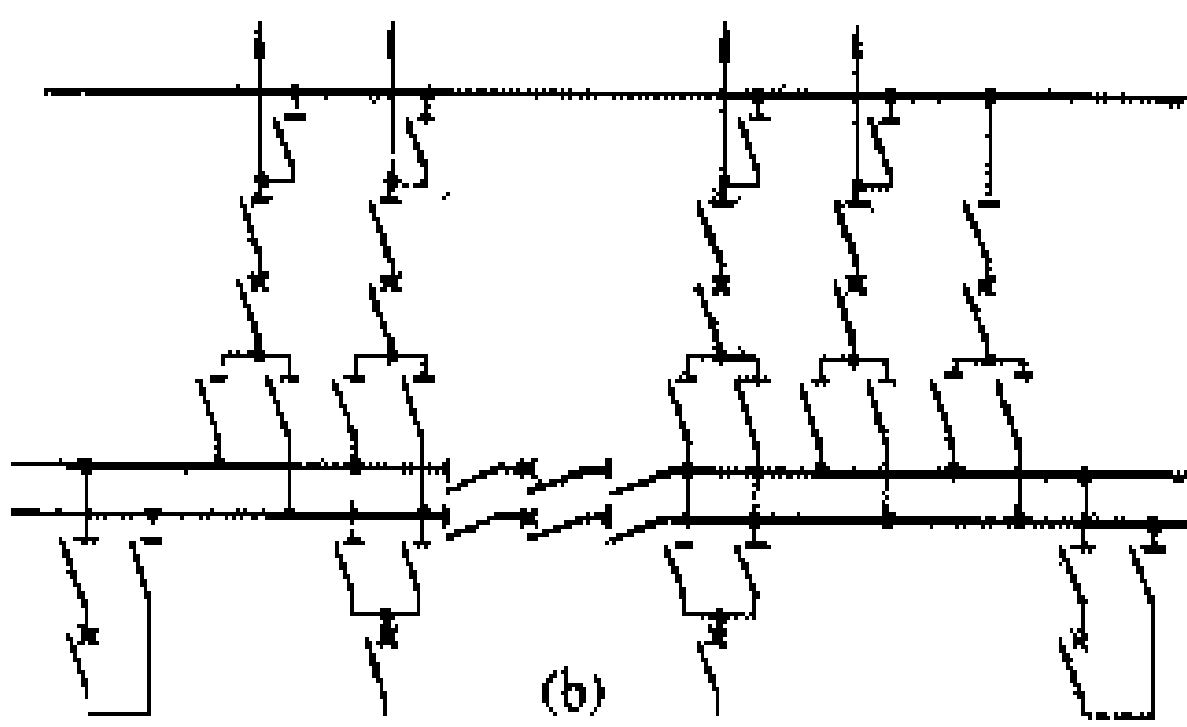
shuangmuxian fenduan dai panglu muxian jiejian

**双母线分段带旁路母线接线** (sectionalized double - bus with auxiliary bus configuration)

由两组分段的主母线和一组旁路母线组成的电气主接线。为了克服双母线分段接线中线路或主变压器回路断路器检修时引起线路或主变压器回路停电的缺点,设置了一组旁路母线(见图)。当线路或主变压器回路的断路器检修时,该回路可以通过旁路隔离开关接至旁路母线,再通过旁路断路器接至相应的主母线,继续正常运行。



(a)



(b)

双母线分段带旁路母线接线

(a) 双母线单分段带旁路母线接线; (b) 双母线双分段带旁路母线接线

旁路断路器的设置方式分为专用和母联断路器兼用两种基本形式,由于两组主母线采用单分段或双分段的形式,通常设置两个旁路断路器回路,当线路或主变压器回路较多时,为了使两个旁路断路器回路同时工作,可以将旁路母线用一组隔离开关分段。

在中国与 220 kV 电力网相连接的大型发电厂以及 500kV 枢纽变电所,当采用敞开式电器时,采用这种接线的较多。

(刘元皋)

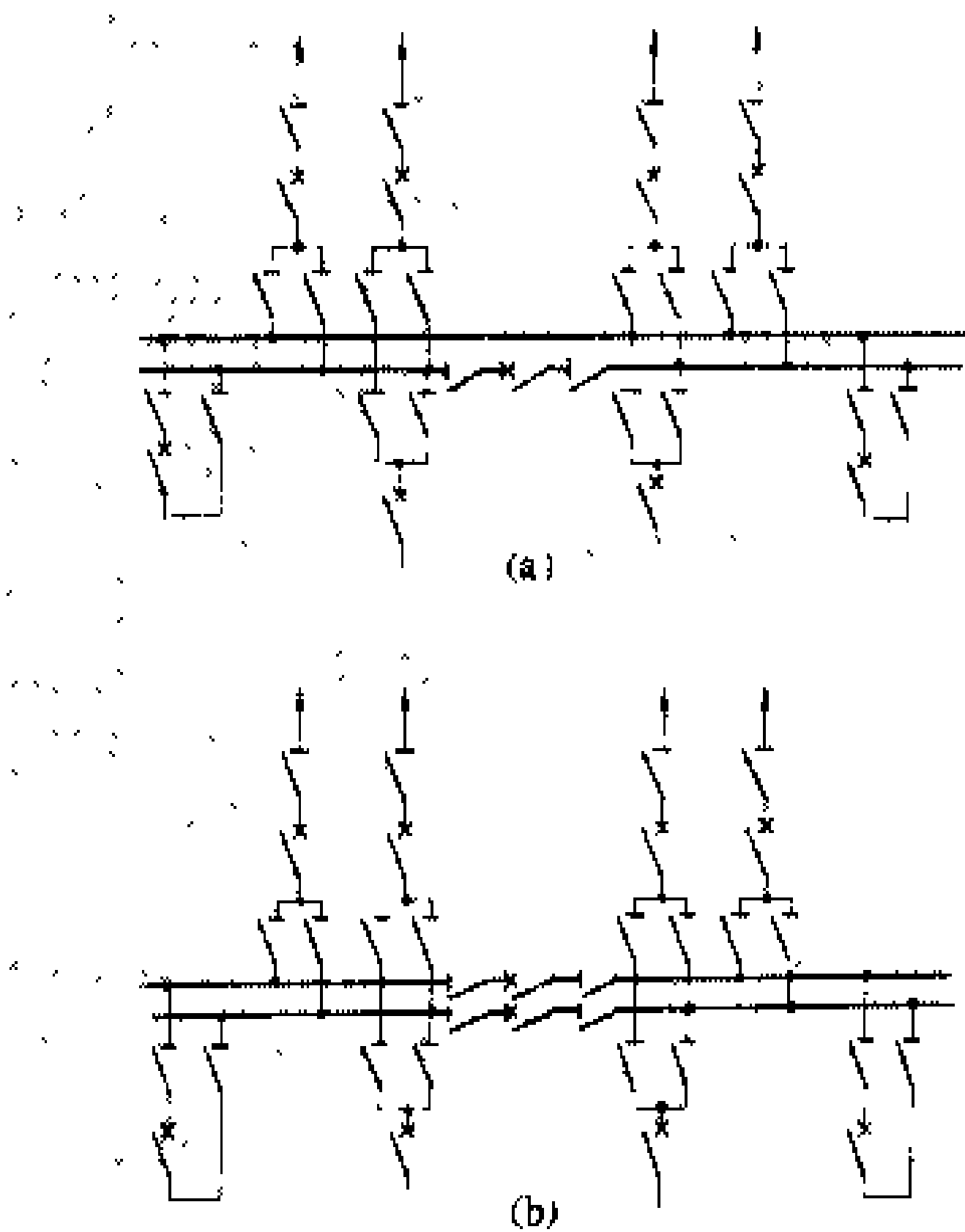
shuangmuxian fenduan jiejian

**双母线分段接线** (sectionalized double-bus configuration) 在双母线接线中的一组母线或两组母线上设置分段断路器的电气主接线。仅在一组母线上设置分段断路器时,称为双母线单分段接线[见

图 1-1-10]



图 (a)], 在两组母线上设置分段断路器时, 称为双母线双分段接线 [见图 (b)]。



双母线分段接线

(a) 双母线单分段接线; (b) 双母线双分段接线

在双母线接线中, 当一组母线发生故障时, 会引起 1/2 回路 (线路或主变压器) 停电; 当母联断路器发生故障时, 会造成全部回路停电。这些缺点在可靠性要求很高的一些变电所中是不能接受的。因此采取将两组主母线进一步以断路器分段的措施。双母线单分段接线的一段母线发生故障时, 只引起 1/3 回路停电, 发生更严重的母联断路器或分段断路器故障时, 引起 2/3 回路停电; 双母线双分段接线的一段母线故障时, 只引起 1/4 回路停电, 母联断路器或分段断路器故障时, 引起 1/2 回路停电。所以将母线分段后, 能够提高供电的可靠性。

在中国与 220kV 电力网相连接的大型发电厂以及 500kV 枢纽变电所, 当选用气体绝缘金属封闭电器时, 采用双母线分段接线较多。

(蓝增廷)

shuangmuxian jiaoxian

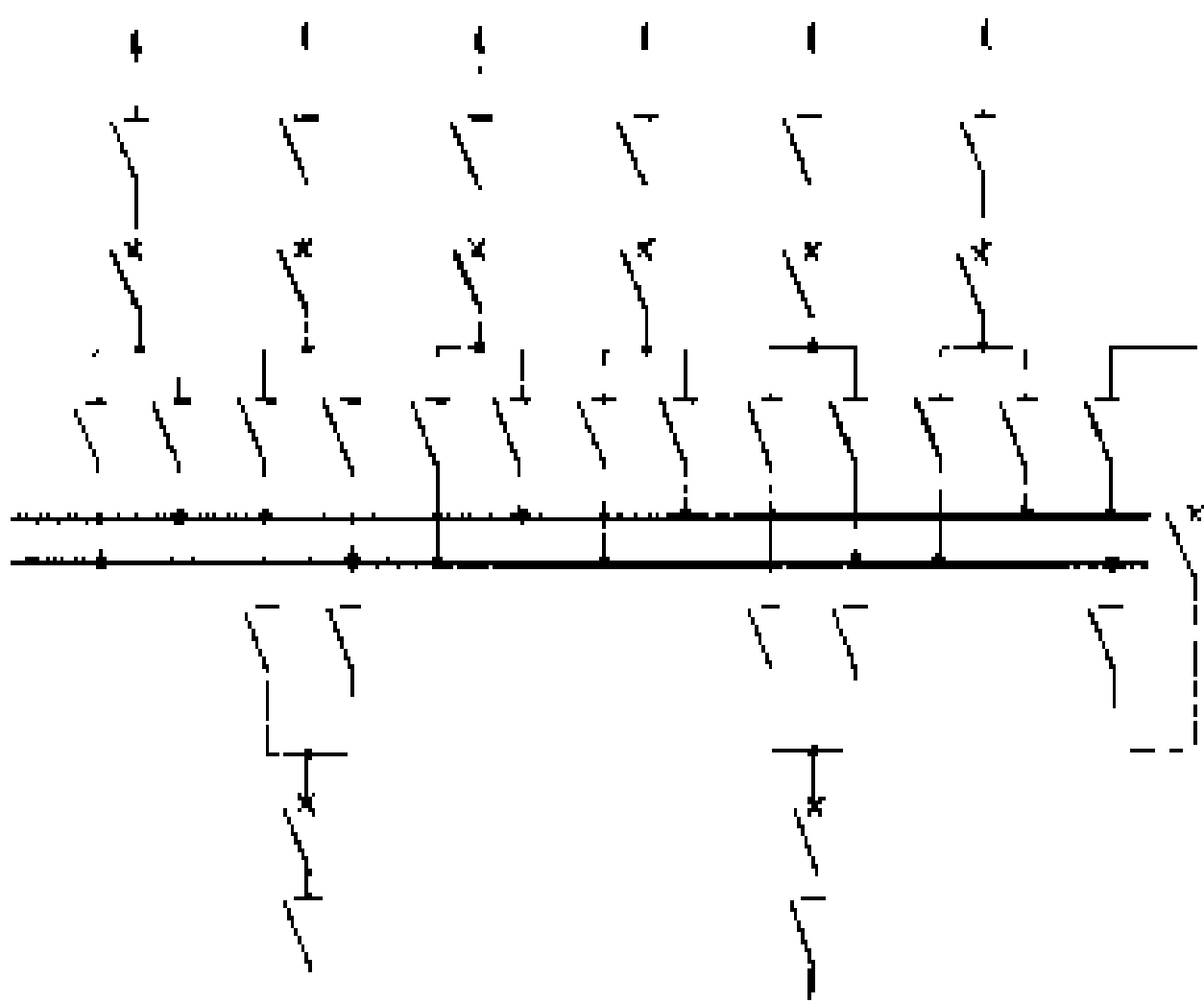
双母线接线 (double-bus configuration)

由变压器回路、线路和两组主母线构成的电气主接线。双母线接线的每一回线路和主变压器回路都通过一台断路器和两组母线隔离开关分别接到两组主母线上, 两组主母线之间设置一台母线联络断路器 (简称母联断路器), 见图。

双母线接线有两种运行方式: ①将两组母线分为工作母线和备用母线。正常运行的线路都连接在工作母线上, 当工作母线或线路的母线隔离开关需要检修

时, 则将全部正常运行线路倒换到备用母线上。当线路断路器需检修时, 可以将该线路倒换到备用母线上, 将检修的断路器短接, 暂时利用母联断路器代替它, 但这种方式较少采用。②两组母线都是工作母线, 同时运行, 电源线路和其他线路可以根据具体情况合理地分别连接到两组母线上, 形成各回线路固定地与一组母线相连接的方式, 以满足母线继电保护的要求, 两组母线通过母联断路器并列运行, 这种方式采用得较多。

双母线接线的优点有: ①当一组母线或母线隔离开关发生故障, 或需进行检修时, 可将该组母线上的所有回路倒换到另一组母线上继续运行。②可根据运行的需要, 调整每组母线上所连接的回路数。③在配电装置中, 通过合理地布置能够避免出线回路的交叉跨越。④当需要单独试验某线路时, 可以将该线路单独连接在一组母线上。⑤如配电装置的场地不受限制, 可方便地向两侧继续扩建。其缺点有: ①当一组母线或母线隔离开关发生故障, 或当线路断路器拒绝动作时, 将使一组母线上的全部线路短时停电。母联断路器故障时, 则会使整个配电装置停电。②当一组母线进行检修, 另一组母线又发生故障时, 将使整个配电装置停电。③母线隔离开关倒换操作频繁, 发生误操作并危及人身和设备安全的机率增加, 因此须在隔离开关和断路器之间设置完善的高压开关设备联锁装置。④母线隔离开关较多, 母线长度较长, 配电装置占地也较大。



双母线接线

当变电所和发电厂的配电装置在电力网中居重要地位, 电力负荷大且出线回路较多时, 通常采用双母线接线。在中国, 当枢纽变电所中 110~220 kV 出线在四回及以上时, 多数采用双母线接线。出线回路较多、连接的电源较多、负荷大的 35 kV 屋外配电装置, 有时也采用双母线接线。

(刘元皋)

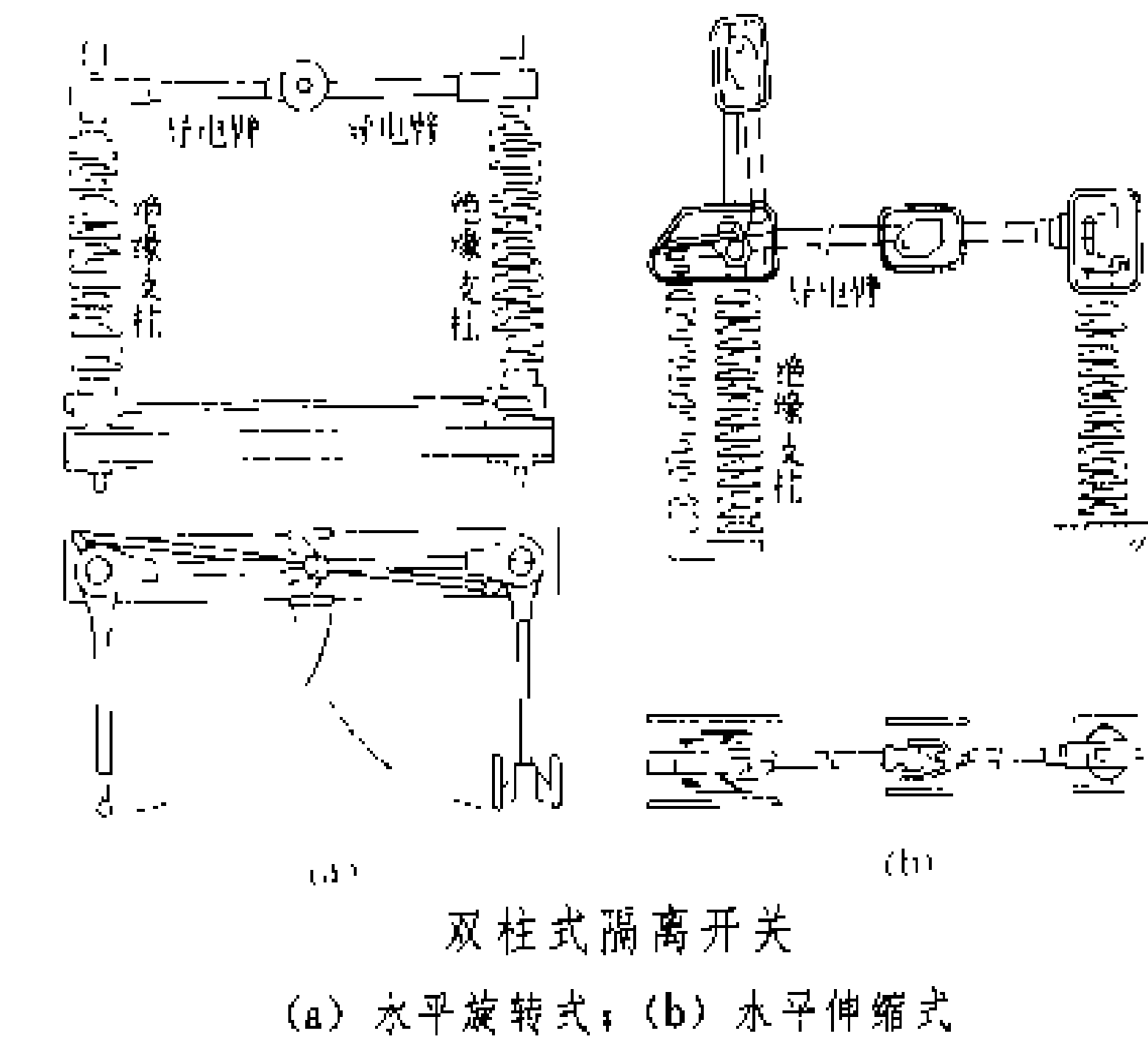
shuangzhushi ge li kaiguan

双柱式隔离开关 (double-post type discon-

necting switch) 由二个垂直布置的绝缘支柱组成的隔离开关。按不同的导电结构可分成水平旋转式和水平伸缩式两种类型。

双柱水平旋转式隔离开关 是在每一个垂直支柱的顶部安装水平方向的导电臂，随着支柱的旋转而改变导电臂位置。绝缘支柱具有支持和操作两种功能。合闸时，两柱的导电臂处于同一轴线上，彼此接触；分闸时，两柱各旋转 90°，两个导电臂也同时旋转，从中间断开形成可见断开点。在绝缘支柱端部装有软连接体系，以实现对外连接。其结构示意图如图 (a) 所示。双柱水平旋转式隔离开关具有活动关节少，结构简单，操作力较小的优点，但当断开时，带电的导电活动臂也跟着旋转 90°，增加了隔离开关的相间距离，从而加大了配电装置的间隔宽度。例如采用 220 kV 双柱水平旋转式隔离开关的配电装置的间隔宽度为 14 m，而其它型式只需要 13 m。但由于双柱水平旋转式隔离开关运行安全可靠，在中国应用广泛，已形成 35~330 kV 系列产品。

双柱水平伸缩式隔离开关 是在一个垂直支柱的顶部安装折叠活动臂，在另一个垂直支柱的顶部安装导电静触头。折叠活动臂收缩时，隔离开关处于断开位置，在二个垂直支柱之间形成水平断开点，起到隔离作用；当折叠活动臂水平伸直时，隔离开关处于合闸位置。其结构示意图如图 (b) 所示。由于折叠活动臂只沿



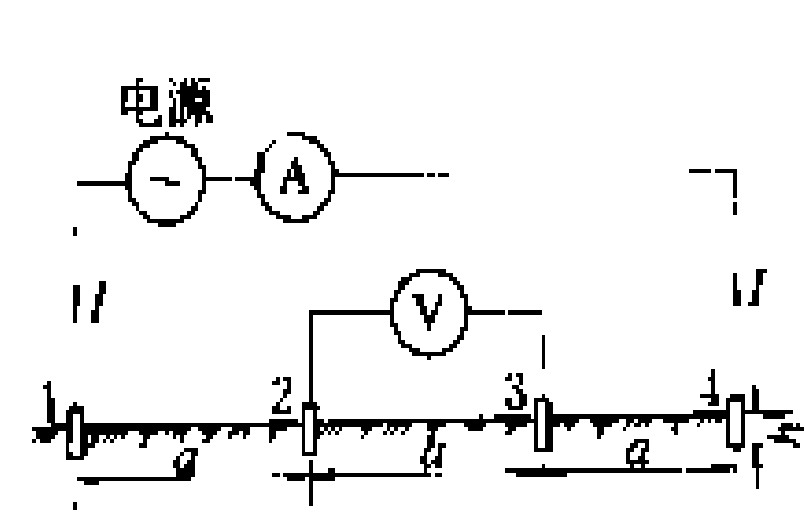
着回路中心线的方向运动，不占有相间空间，因此这种隔离开关具有所要求的相间距离比较小的优点。但折叠活动臂结构较复杂，隔离开关的价格较贵，通常只在 500 kV 对相间距离要求很高的情况下采用。

(蓝增环)

四极法

(four-terminal method) 用两个电极使土壤中通过电流，再用另两个电极测出中间部

分地面两点电位差，从而算出土壤电阻率的方法，又称温纳 (Wenner) 法。



四极法测土壤电阻率

如图所示，四个电极处于一条直线上，其间距为  $a$ ，埋深为  $h$ ，取  $a \geq 10h$ 。当电流极 1、4 流过的电流为  $I$ ，测得电压极 2、3 间的电压为  $U_{23}$  时，可按下式算出土壤电阻率  $\rho$

$$\rho = 2\pi a \frac{U_{23}}{I} = 2\pi a R$$

式中  $R = \frac{U_{23}}{I}$ 。

用四极法测土壤电阻率时，电流极 1、4 的接地电阻值只会影响通过的电流值  $I$ ，但由于  $U_{23}$  与  $I$  成正比，所以不会影响  $\rho$  值的测量结果；而电压极 2、3 的接地电阻值只要比电压表的内阻小得多（这在一般情况下是不成问题的）就不会影响电压表上  $U_{23}$  的读数和  $\rho$  值的测量结果。因此在将四个电极打入地中时不需要什么特殊的要求，这是本法的突出优点。测量时可以按图示用电流表及电压表测出  $I$  及  $U_{23}$ ，也可用接地摇表直接测出  $R = U_{23}/I$ ，再用  $\rho = 2\pi a R$  进行计算。用四极法测得的  $\rho$  值是电压极中间区域土壤的平均电阻率。如果  $a$  值取得很小，可测出某一局部表层的  $\rho$  值，如果  $a$  值取得大一些，则测得的区域和深度都相应变大。

(解广润)

Sulian beifang dagonglu shiyanzhan  
苏联北方大功率实验站 (high power laboratory of HVARC of USSR) 与莫斯科市区北部北方变电站毗邻的苏联高压电器研究中心，是苏联最大的大功率实验站。它由冲击同步发电机和引入电网提供试验电源。电网部分的试验能力为

一回 500 kV 线路：二相—3500 MV·A，单相—1880 MV·A；

一回 220 kV 线路：二相—2640 MV·A，单相—1780 MV·A；

一回 110 kV 线路：二相—2420 MV·A，单相—1650 MV·A。

电网部分设有 5 个试品间：500 kV 三相的 1 个，220 kV 单相、三相的各 2 个。

3 台冲击同步发电机是：两台 TH 100 型，每台标称短路容量为 2500 MV·A；一台 TH-75 型，其标称短路容量为 1250 MV·A。6 台升压变压器的单台容量均为 33.3 MV·A，短路阻抗均为 3.5%。冲击同步

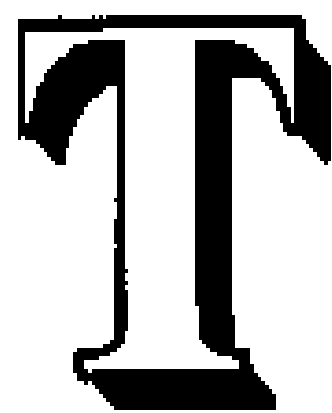
发电机部分也设有 4 个试品间：35 kV 三相的 2 个，220~500 kV 单相的 2 个。

冲击同步发电机部分与电网部分可以并联运行。  
合成试验的主电容器组总储能容量为 2.4 MJ，直流最高充电电压为 900 kV。

电网部分可进行近区故障、操作空载长线和操作空载变压器的试验，这些试验也可在人工线路上进行。  
(顾宪鸿)

Sulian Zhiliu Shudian Yanjiuyuan Gaoya Jishubu  
**苏联直流输电研究院高压技术部** (High Voltage Technology Department of High Voltage Direct Current Power Transmission Research Institute of USSR) 位于苏联列宁格勒市北郊，是 1945 年为了解决远距离输电及全苏统一电网中的技术问题（特别是直流输电建设中所产

生的综合性技术问题）而建立的研究机构。该部除建有供研究 1500 kV 直流输电线路导线电晕、杆塔空气间隙及绝缘子串的电晕、架构、真型架空线路模型线段外，还有研究 1150 kV 交流输电线路的全套试验设施。该部还设有专门的实验室，对运行中的电气设备内绝缘残余寿命及污秽绝缘进行研究，其研究结果具有一定特色。  
该院户外试验场上建有 5 MV、800 kJ 的冲击电压发生器一台，2250 kV、1A 的工频试验变压器及 1200 kV 直流高压发生器两套，并有一段 350 m 长的试验线段。该院还建有两个试验大厅，其尺寸均为 60 m×30 m×25 m（高）。厅内设有 600 kV 工频试验变压器，4 MV 冲击电压发生器及 1200 kV 直流高压发生器各一台，有 900 kV 穿墙套管一支，可将电压引出。  
参见彩图插页第 45 页 132 图。  
(徐士珩)



Taipingyang lianluoxian

**太平洋联络线**（Pacific Intertie）在美国西部太平洋沿岸用汞弧阀建成的规模最大、架空线最长的直流输电工程。建设该工程的目的是为了加强美国西北与西南电力系统间的联络。这一带原有多个电力系统。1964年，由于下列原因，计划建设南北联络线：①美国西北部和西南部出现尖峰负荷的季节不同，建设南北联络线可以提高各系统发电设备的利用率；②联网后的系统有利于事故紧急支援，从而也能提高可靠性；③西北部以水电为主，而西南部则以火电为主，建设南北联络线可以实现水火电厂的经济运行；④西北部丰水期有多余的电力南送，而在枯水期则从西南部取得电力。因而，美国在太平洋沿岸形成了交直流并联输电系统。其中，直流输电线路由俄勒冈州的塞里罗（Celilo）至加利福尼亚州的锡尔玛（Sylmar），其额定直流电压为±400 kV，输送功率1440 MW，路径长1361 km，于1970年投入运行。1984年，增加了两组水冷晶闸管阀，其额定直流电压100 kV，分别串联在两极的极侧。1985年，直流线路升压到±500 kV，每极直流电流2000 A，输送功率增至2000 MW。用大地回路或金属回流电路时，单极可送1000 MW。并列的交流线路由俄勒冈州的约翰迪（John Day）至亚利桑那州的卢戈（Lugo），

美国太平洋联络线的  
地理位置图

其额定交流电压为500 kV，双回输电线路，输送功率为2000 MW，线路长度两回共为3200 km。

直流输电系统采用的是双极三桥接线。直流架空线路极导体采用型号为ACSR-2×1171 mm<sup>2</sup>的两分裂钢芯铝绞线，双极线路同塔架设。在两端换流站中，采用由瑞典通用电气公司（ASEA）制造的6阳极汞弧阀，以后串联的100 kV晶闸管阀组也是该公司提供的。所使用的换流变压器是三相双绕组变压器，其网侧绕组分别连接于额定电压均为230 kV的送端和受端交流电力系统。两侧换流站均装设有5、7、11、13次和高通交流谐波滤波器以及6次和高通直流脉动滤波器。在西北部的塞里罗换流站，除了交流谐波滤波器能提供基波无功功率340 Mvar之外，还装设320 Mvar静电电容器作为无功补偿设备。在西南部的锡尔玛，交流谐波滤波器可供应370 Mvar基波无功功率。

美国太平洋联络线是投入运行比较早的超高压、远距离、大容量直流输电工程。它的建成，对直流输电技术的发展具有很大的促进作用，尤其是作为世界上第一个超高压交直流并联输电系统。关于它的研究成果以及在建设和运行中所取得的经验，对其后兴建的交直流并联输电工程，具有十分重要的实用价值。

（任 震）

taoguan

**套管**（bushing）将带电导体引入电气设备或穿过墙壁的一种绝缘装置。前者称为电器套管，后者称为穿墙套管。套管结构一般由导体（导杆）、绝缘体和金属法兰三个部分组成。导体沿圆柱形绝缘体的轴线穿过，金属环形法兰则安装在绝缘体外并用以接地。套管属于具有强垂直电场分量的绝缘结构，在金属法兰处电场强度很大，容易产生电晕放电和沿介质表面的滑闪放电。在法兰和导杆间径向电场强度也很高，容易发生绝缘介质的击穿。除35 kV及以下的套管使用单一固体绝缘材料外，常采用多种绝缘材料或采取电场均匀措施，使轴向和切向电场分布趋于均匀。

套管的设计通常要满足：①在长期工作电压下不发生局部放电或热击穿；②在工频耐压试验时不发生滑闪放电；③在工频和冲击电压试验时不发生击穿或闪络。

套管的种类较多，按结构特点和主要绝缘介质不同，可分为单一绝缘材料套管（包括纯瓷套管、树脂套管）、复合绝缘套管（包括充油套管、充气套管）和电容式套管（包括油纸电容式套管、胶纸电容式套管）三类。

**纯瓷套管**以瓷和空气为绝缘的套管。由于结构比较简单，广泛用于35 kV及以下的穿墙套管和

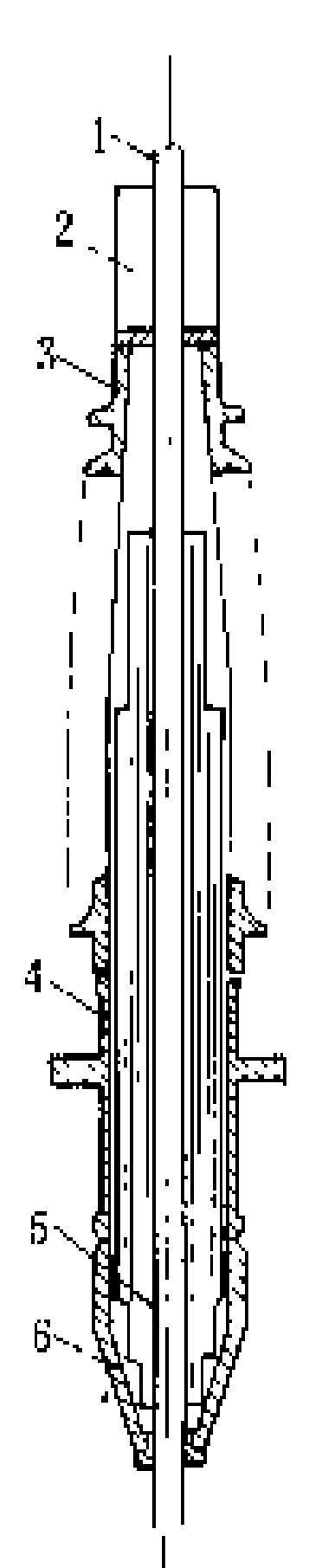
10 kV 及以下的电器套管。为保证有足够的爬电距离，瓷套的户外部分还设有棱。为防止瓷套内空气发生电晕，常在瓷套的表面喷以金属涂层和加大导杆直径，以改善电场分布。

充油套管 以瓷套内腔充填的绝缘油加绝缘屏障为主要绝缘的套管。仅在瓷套内充以绝缘油的套管，即瓷-油套管，多用于 110kV 及以下的电压等级。对于更高的电压等级，则采用导电杆包绝缘纸或套胶纸筒的措施，或在油隙中加入多层同心圆柱绝缘屏障，以提高击穿电压。有时还在绝缘屏障上敷设金属极板，以均匀电场分布。

充气套管 在瓷套内腔充以六氟化硫 (SF<sub>6</sub>) 气体绝缘的套管。通常用作气体绝缘金属封闭电器 (GIS) 的出线套管。

电容式套管 以油纸或胶纸为主要绝缘，并以电容屏来均匀径向及轴向电场分布的套管。现代高压电气设备的电器套管及穿墙套管多为电容式套管。电容式套管的核心部分是电容芯，它是由多层油纸或胶纸构成的密集绝缘体。绝缘层间夹进金属箔电极，构成多个同心圆柱形的电容器。同心圆柱形电容器电极的直径由内向外依次增加，而其长度则依次减少。电极的直径及长度按一定规律选取，使径向及轴向的电场分布趋于均匀，以使在满足电气性能要求的前提下套管的尺寸最小 (见图)。为改善金属箔电极边缘处的电场分布，有时采用半导体极板或半导体滚边的金属箔极板。

参见彩图插页第 21 页 64 图。



电容式套管示意图  
1—导杆；2—油枕；3—上瓷套；4—中间法兰；5—电容芯子；6—下瓷套

电压和电流混合组成的关系式  $(u+iZ)$  的值永远不变，即有  $u+iZ=常数$ 。图 1 (a) 是表示前行混合波的电压  $u$  和电流  $i$  间关系的一组特性线，特性线的斜率均为  $du/di=-Z$ 。反行混合波  $(u-iZ)$  永远以光速  $v$  逆着导线给定的  $x$  正方向传播，当观察者沿  $x$  的负方向和反行混合波一起运动时，他在线路任一点上看到的电压和电流混合组成的关系式  $(u-iZ)$  的值永远不变，即有  $u-iZ=常数$ 。图 1 (b) 是表示反行混合波的电压  $u$  和电流  $i$  间关系的一组特性线，特性线的斜率均为  $du/di=Z$ 。给出线路某点的电压和电流 (例如 A 点的电压  $u_A$  和电流  $i_A$ )，则特性线组中通过  $u_A$  和  $i_A$  的那两条特性线即为计算中应用的前行和反行混合波特性线。利用这两条特性线和由导线两端边界条件所决定的伏安特性，即可求出导线两端的电压和电流。

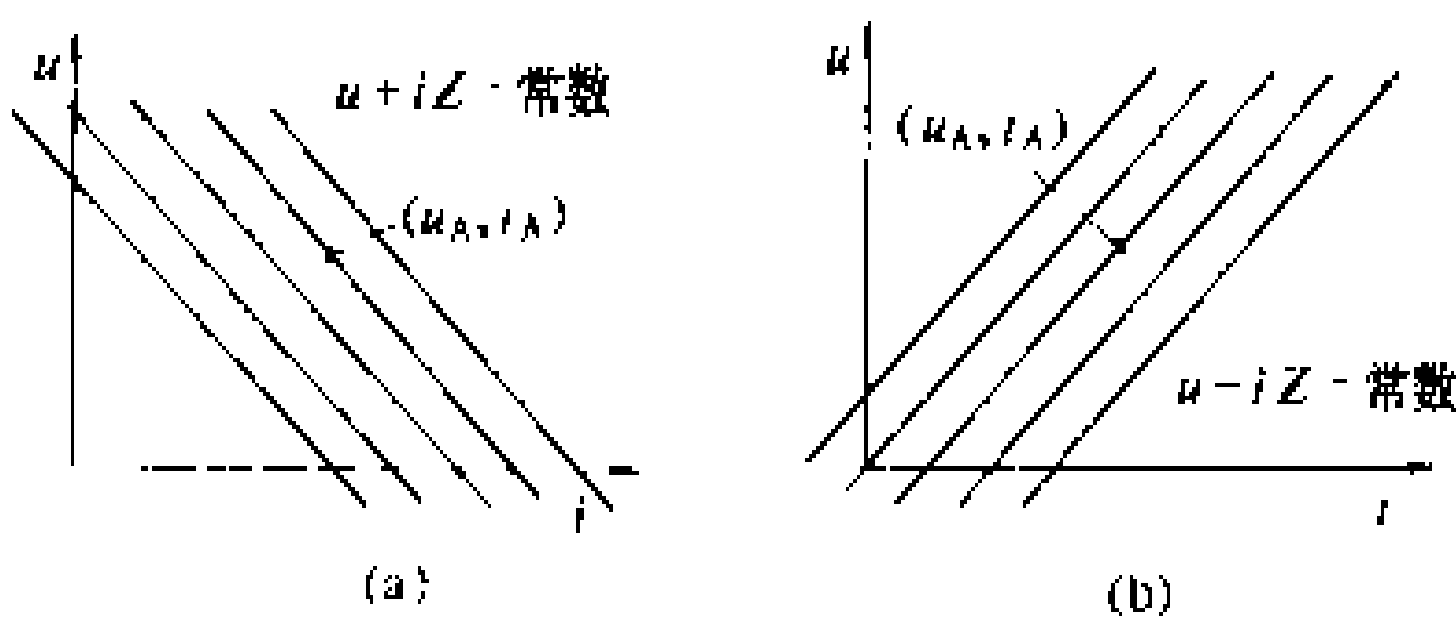


图 1 混合波的特性线  
(a) 前行混合波；(b) 反行混合波

对只有一段分布参数导线的回路，特性线法的波过程计算可利用作图来完成。图 2 为作图法计算直流电源  $E$  经电阻  $R_A$  合闸到末端接有电阻  $R_B$  的线路 (线路的长度为  $l$ ，波阻抗为  $Z$ ) 的实例。 $t=0$  时，A 点的电压由开关右侧传来的、通过  $b_1$  点 (即坐标原点) 的反行混合波特性线和线路首端 A 处的伏安特性曲线  $u=E-i_A R_A$  的交点  $a_1$  决定，此时 B 点的电压为零。 $t=\frac{l}{v}$  时，由 A 点出发的前行混合波到达 B 点，B 点的电压可由通过  $a_1$  点的前行混合波特性线和 B 点的伏

texingxian fa

特性线法 (method using characteristic line)

应用混合波对分布参数电路中的波过程进行分析的一种方法，也称贝热龙法。是由法国的 L. 贝热龙 (L. Bergeron) 在 1928 年提出的，最初用于解决水力学的问题，后来才用于电路上，如用于电力系统中的过电压计算。

混合波有前行混合波  $(u+iZ)$  和反行混合波  $(u-iZ)$  两种，其中  $u$  和  $i$  为导线各点的实际电压和电流， $Z$  为导线的波阻抗。前行混合波  $(u+iZ)$  永远以光速  $v$  沿导线给定的  $x$  正方向传播，当观察者沿  $x$  的正方向和前行混合波一起运动时，他在线路任一点上看到

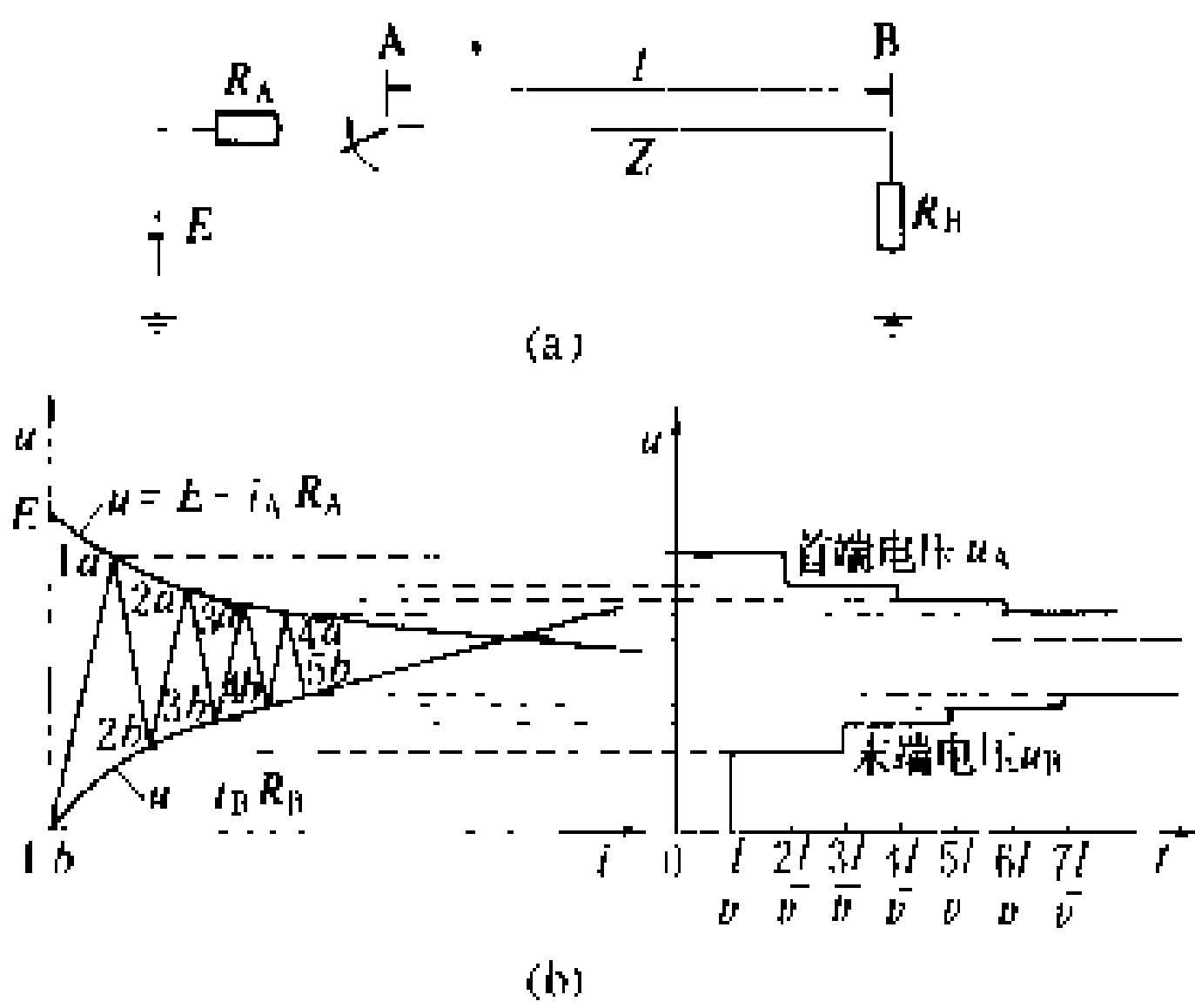


图 2 直流电源经电阻  $R_A$  合闸到末端接有电阻  $R_B$  的线路

安特性曲线  $u=i_R R_N$  的交点  $b_2$  决定。 $t=\frac{2l}{v}$  时, 由 B 点出发的反行混合波到达 A 点, 使 A 点的电压发生变化, 其值由通过  $b_2$  的反行混合波特性和 A 点伏安特性曲线的交点  $a_2$  决定。依次类推, 即可得图 2 (b) 右侧的  $u_A$  和  $u_B$  随时间变化的曲线。

对有多段分布参数导线和多个集中参数储能元件的比较复杂的网络, 特性线法的波过程计算要借助计算机用专门的数值计算程序来完成。图 3 (a) 为分布参数导线及其数值计算用的等值电路, 图中  $u_k$  和  $u_m$  为导线两端的电压,  $Z$  为导线的波阻抗, 等值电路中的  $I_k(t-\tau)$  和  $I_m(t-\tau)$  分别为

$$I_m(t-\tau) = -\frac{2}{Z}u_k(t-\tau) - I_k(t-2\tau)$$

$$I_k(t-\tau) = -\frac{2}{Z}u_m(t-\tau) - I_m(t-2\tau)$$

式中  $\tau$  为波在线路上的传播时间。

图 3 (b) 为电感元件  $L$  及其数值计算用的等值电路, 图中  $u_k$  和  $u_m$  为电感两端的电压, 等值电路中的  $I_L(t-\Delta t)$  为

$$I_L(t-\Delta t) = I_L(t-2\Delta t) + \frac{2}{R_L}[u_k(t-\Delta t) - u_m(t-\Delta t)]$$

式中  $\Delta t$  为计算所用的时间步长, 其值应尽量小并能整除波在各条线路上的传播时间;  $R_L = 2L/\Delta t$ 。

图 3 (c) 为电容元件  $C$  及其数值计算用的等值电路, 图中  $u_k$  和  $u_m$  为电容两端的电压, 等值电路中的

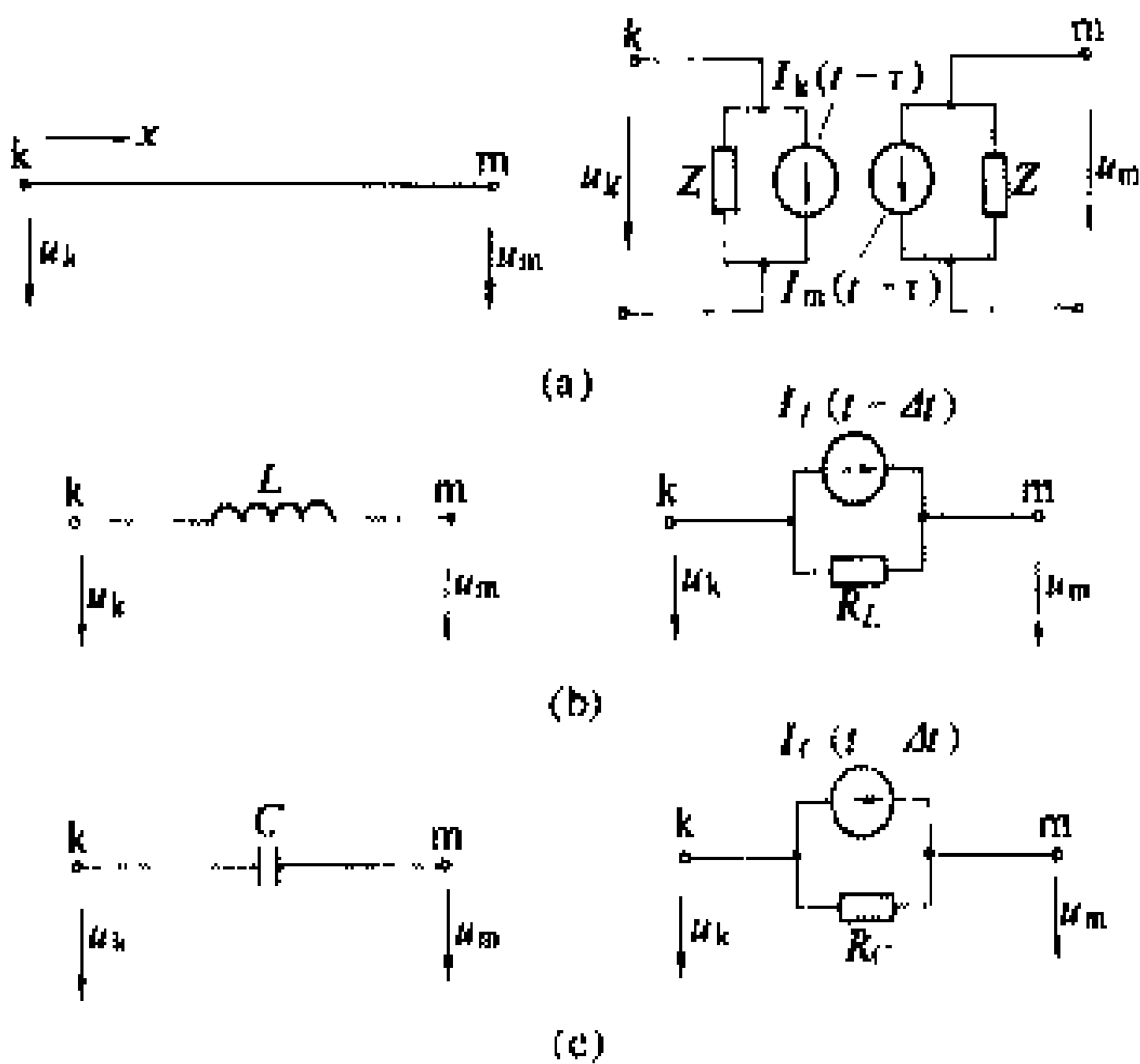


图 3 特性线数值计算用的各类元件的等值电路

(a) 分布参数导线及其计算电路; (b) 电感元件及其计算电路; (c) 电容元件及其计算电路

$$I_C(t-\Delta t) \text{ 为}$$

$$I_C(t-\Delta t) = -I_C(t-2\Delta t) - \frac{2}{R_C}[u_k(t-\Delta t) - u_m(t-\Delta t)]$$

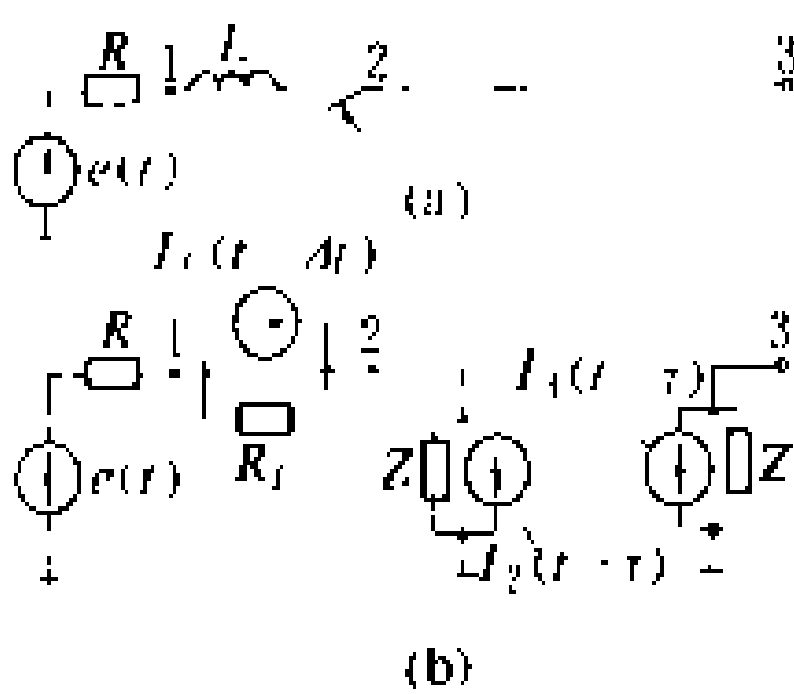


图 4 具有分布参数导线和集中参数储能元件的网络及其等值电路图 (a) 网络接线; (b) 等值电路

图 4 (a) 为一个兼有分布参数导线 (波阻抗为  $Z$ ) 和集中参数储能元件 (电感  $L$ ) 的网络, 网络中结点 1、结点 2 和结点 3 的电压可用图 4 (b) 的等值电路图求出。

**参考书目**

解广润主编. 电力系统过电压. 北京: 水利电力出版社, 1991

(陈慈荃)

Tianjin beijiao 500kV biandiansuo  
**天津北郊 500 kV 变电所** (north suburban 500 kV substation of Tianjin) 中国华北地区电力网的 500 kV 枢纽变电所, 担负着向天津地区的供电任务。1985 年开始建设, 1987 年 11 月投入运行。

**工程规模** 它是在原来 220 kV 变电所基础上的扩建工程, 包括 500 kV、220 kV、15.75 kV 三级额定电压。500 kV 出线最终为 6 回, 本期 1 回。220 kV 出线最终为 14 回, 本期 10 回。15.75 kV 无出线, 连接 160 MV·A 的同步调相机。此外 500 kV 部分还包括 7 台单相 267 MV·A 主变压器 (6 台工作, 1 台备用), 本期 4 台 (3 台工作, 1 台备用)。最终需要安装 2 台 160 MV·A 同步调相机, 本期为 1 台。

**总体布置** 全所分成三个区域: 500 kV 配电装置、220 kV 配电装置、主变压器区域。变电所北半部布置 500 kV 配电装置, 南半部布置 220 kV 配电装置, 中间部分是主变压器区域, 它包括 500 kV 主变压器、同步调相机和主控制楼。是典型的对侧布置、对侧出线的总体布置方案, 主控制楼位于全所中央, 总占地面积为 96370 m<sup>2</sup>。

**电气主接线** 500 kV 配电装置采用一个半断路器接线, 6 回出线和 2 组主变压器共 8 个元件组成 4 个整串。线路或主变压器的配置原则是: ①同名元件 (双回线路或两组主变压器) 布置在不同的串中; ②同名元件分别接入不同的母线, 以避免在一台断路器检

修而另一台断路器发生故障时,同时失去2个同名元件,影响地区的供电。220 kV 配电装置采用双母线带旁路母线接线,设专用旁路断路器。

主要电气设备 500 kV 母线的短路电流远景规划为 35 kA 左右,而 220 kV 母线的短路电流水平近期就已达到 50 kA 左右。因此选择两类不同的电气设备。①500 kV 主变压器采用苏联 AOJITTH26700/500/220 V1 型单相自耦强迫油循环风冷电力变压器,500 kV 断路器采用德国西门子公司生产的 3AS5-525 型六氟化硫断路器,500 kV 电流互感器采用瑞典 ASEA 公司生产的 IMBE 550A6 型电流互感器,500 kV 避雷器采用瑞典 ASEA 公司的两种 XAP550S/444S 和 XAP550S/420S 型金属氧化物避雷器,系统继电保护装置采用美国 GE 公司和德国西门子公司产品,监控装置采用瑞士 BBC 公司的计算机系统。②中国设备主要是 220 kV 及以下的断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、元件保护、控制屏、所用电屏以及直流设备。

高压配电装置 500 kV 配电装置采用一个半断路器接线平环式布置方案,每一串中的 2 台母线断路器顺着出线方向布置,中间联络断路器垂直出线方向布置,三台断路器形成一个“环形”。500 kV 配电装置具有 5 个特点:①配电装置每一串都可以向任意两个相反的方向引线,出线方向灵活,适应性强;②配电装置的静电感应影响最小;③配电装置运输条件好,运行及检修方便;④配电装置构架最少,结构最简单;⑤配电装置为长方形状,与周围地形配合较好,适合于与 220 kV 配电装置对侧布置、反向出线的总体布置设计。

220 kV 配电装置采用单柱式隔离开关配合支持式铝管母线的中型布置方案。具有整齐、美观、占地面积小的优点。

二次回路设备 全所采用强电一对一直接控制的方式,直观性强,便于操作。选用二组 GGF-500 A·h、220 V 直流蓄电池组,互为备用,直流系统可靠性高。为了简化直流系统接线,便于运行维护,取消了端电池。自动装置部分配置以计算机为基础的事故记录和数据采集系统,与常规监测仪表同时使用。

参见彩图插页第 11 页 33 图。

(蓝增环)

tiem xiezhen guodianya

**铁磁谐振过电压** (ferro-resonance over-voltage) 在市带铁芯的电感元件和串接电容组成的振荡回路中,由于铁芯磁饱和所引起的非线性的谐振过电压。电力系统中的铁芯电感元件系指各类电

气设备的铁芯励磁绕组。在额定工作电压下,链过这些绕组的最大磁通密度略低于磁饱和点,故正常运行时的电感是线性的。当由于操作或故障而发生电压升高和出现暂态过程时,铁芯趋于饱和,电感呈现出非线性状态,从而会在振荡回路中激发起持续性的铁磁谐振现象。

电力系统中最常出现的铁磁谐振过电压,包括断线谐振过电压、电压互感器饱和过电压以及非全相运行过电压。

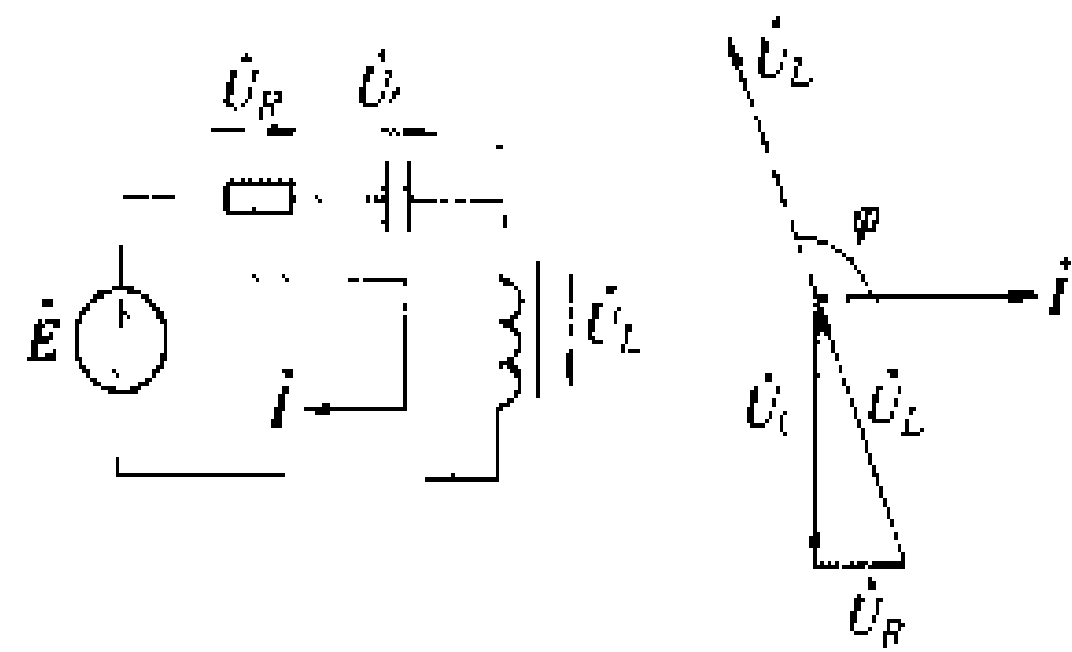
自激与他激 对于某一既定的铁芯电感,在不同电容参数的配合下,有时可能自发地产生的谐振现象,称为自激或软激发,有时则需经历一定的暂态过程,以使瞬间的励磁电流达到足够高的磁饱和点才能发生的谐振现象,称为他激或硬激发。对于他激,由于每次形成激发的起始条件和相应暂态过程的强烈程度不同,每次激发的结果,谐振可能产生,也可能不产生,呈现出一定的概率规律。

由于自激谐振的条件决定于谐振回路的参数配合和电源电动势的大小,而与暂态过程的激发与否无关,因此即使缓慢而平滑地改变某一参数或电源电动势,自激振荡可能突然发生或消失,这种现象称为铁磁谐振的跃变。

工频、高频和分频谐振 铁磁谐振的频率可以等于电源频率的  $K$  倍, $K=1$  时称为工频谐振, $K$  值可能等于简单的整数(例如 2, 3, 5 等)或分数(例如  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $3/5$  等),分别称为高频谐振和分频谐振。高频谐振和分频谐振电压的波形中,除谐振频率的分量外,还存在着足够大的与电源电动势平衡的工频强制分量。

在发生高频或分频谐振时,维持谐振的能量是由工频能量转化而来,显然,只有工频能量被有节奏地引入回路,才能达到累积性的能量转移,这是  $K$  值应是简单整数或分数的主要原因。

图示为最简单的谐振回路, $E$  为工频电动势, $I$ 、 $U_R$ 、 $U_C$  和  $U_L$  为  $K$  次谐波( $K \neq 1$ )的电流和压降,相量关系如图所示。这里  $\varphi > 90^\circ$ ,  $U_L I \cos \varphi < 0$ ,即铁芯电感放出能量,从而实际成为一个转化电源能量以抵偿电阻损耗的  $K$  次谐波的发生装置。



铁磁谐振接线图和  $K$  次谐波相量图

为能产生稳定的铁磁谐振,首先,回路中的等效阻尼电阻不能太大;其次,在外激情况下,回路应当经历足够强烈的初始暂态过程。此外,还应满足必要条件  $K\omega L_0 > \frac{1}{K\omega C}$ , 或者写成

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C}} < K\omega$$

式中  $\omega$  为工频角频率;  $L_0$  为铁芯电感的起始未饱和值;  $\omega_0$  为自振角频率。这是因为,当发生磁饱和而等效电感下降时,  $\omega_0$  就将增加到  $K\omega$  的水平,从而可能建立起该频率的谐振。上式还表明,随着电容  $C$  的增大,可能依次发生高频、工频和分频谐振,同时,在  $C$  值的一定区间范围内,均可发生  $K$  次谐波的铁磁谐振。

**铁磁谐振过电压的幅值和危害** 通常,铁芯电感磁化曲线的非线性度愈高,谐振愈易发生。反之,线性度愈高,则在外激谐振情况下,为能达到足够高的磁饱和点,所需的暂态冲击也愈强,其实际可能性和相应的谐振概率就愈小,直至谐振现象不再发生。但是,线性度愈高时,一旦产生谐振,则其过电压也愈高。此外,从磁化曲线本身来看,铁芯类似于一个避雷器的阀片,能使电感端部电压不致超越一定的限度,因此,铁磁谐振过电压虽由铁芯电感的非线性所引起,但其幅值最终又受铁芯磁饱和效应的限制。

高频和工频铁磁谐振过电压的幅值一般较高,可达额定值的 3 倍以上,起始暂态过程中的幅值可能更高,危及电气设备的绝缘结构。同时,由于铁磁谐振过电压的稳态性质,会使回路中的阀式避雷器或其间隙均压电阻发生爆炸或烧毁。

在产生分频铁磁谐振时,由于励磁感抗成倍下降,过电压并不很高,一般在两倍额定值以下。但是,感抗的下降会使磁路严重饱和以及励磁电流急剧上升,励磁电流的幅值可能达到额定值的数十倍以至百倍以上,导致铁芯的强烈振动,并使互感器等小容量设备及其保险熔丝发生过热烧毁事故。

铁磁谐振过电压还会造成某些其他的不利后果,例如使绕组端部电压的相位发生反倾,产生三相对地电压的零序分量而引起虚幻的接地信号等。

**抑制措施** 在实际电力系统中,铁磁谐振过电压是发生最为频繁和引起事故最多的一种内部过电压,其主要的抑制措施有:①在三相正序或零序回路中瞬间或长期投入阻尼电阻;②采用励磁特性良好的铁磁元件;③谐振发生后进行适当的倒闸操作,借以改变回路参数和破坏谐振条件。

目前,人们主要通过模拟试验和数值计算在探索新的简单易行的消谐方法,并从理论角度深入研究某

些复杂接线回路中的谐振机理。

#### 参考书目

Hayashi C. Selected Papers on Nonlinear Oscillations. Nippon Printing and Publishing Company, 1976

(陈维贤)

tongbu tiaoxiangji

### 同步调相机 (synchronous condenser, SC)

不带机械负载也不带原动机,专用于向电力网供应或吸收无功功率的同步电机。同步调相机过励磁运行时,相当于并联电容器,供应电力网无功功率;欠励磁运行时,相当于并联电抗器,吸收电力网的无功功率。同步调相机的工作原理与同步发电机基本相同。其主要优点是:①无功出力调节平滑,便于控制母线电压;②既能供应无功又能吸收无功,而且调节幅度大,一般可以供应 150% 或吸收 50% 的额定容量,必要时还可在负励磁下运行,使吸收无功的能力增大  $X_d/X_q$  倍 ( $X_d$  及  $X_q$  分别为调相机的直轴及交轴同步电抗);③电压稳定性好,在端电压突变时能立即作出反应减少电压变动;④有较大的短时过负荷能力,能在电网故障电压下跌时,强行励磁支撑电压;⑤单台容量大,足以满足系统需要。缺点是投资较大,运行维修复杂,损耗大,需冷却水源,起动和响应速度较慢,噪音较大。

**主要类型** 同步调相机按其不同的冷却方式可分为空冷调相机、氢冷调相机和全水内冷调相机三种。

**空冷调相机** 以空气作为循环冷却介质的同步调相机。一般容量在 30MV·A 及以下,6 极,户内密闭循环式,其中小于 10MV·A 的多用开启式,其能耗率较高,一般为 2%~3%。

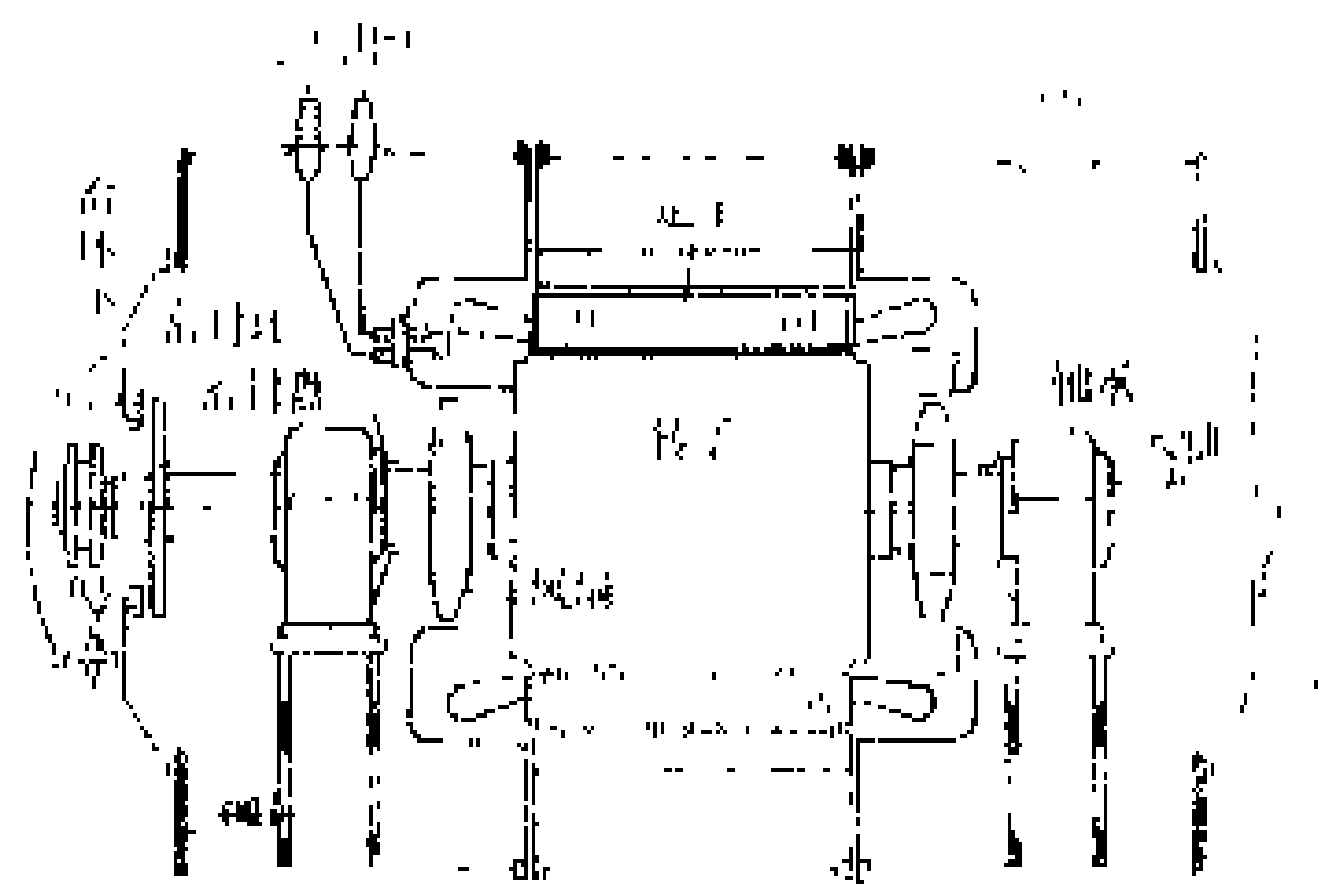
**氢冷调相机** 以氢气作为循环冷却介质的同步调相机,是目前使用最多的一种调相机。安装比空冷调相机方便,可装在户外。容量一般为 50~250MV·A,8 极,其能耗率为 1%~1.5%。如图所示为氢冷调相机的剖面结构图,其结构布置特点为:①大轴、轴承及滑环、炭刷(如用同轴励磁机或起动电动机,则也包括在内)全部都装在充满氢气的机壳内,这样可省去密封瓦及其配套装置,还可减少漏氢量;②装有一个用压缩空气控制的密封环,平时不充气,密封环在弹簧的作用下与密封盘保持脱离,需停机维修滑环、炭刷时,向密封环内充气,使密封环与密封盘压紧,将滑环小室与本体隔绝,以免打开滑环小室时机内氢气跑掉。

**全水内冷调相机** 定、转子绕组和定子铁芯全部用水内冷,适用于特大容量的调相机。如美国杜蒙(Dumont)变电所使用的一台全水内冷调相机,容量为 345MV·A,8 极,运输尺寸比 125MV·A 的氢冷调



相机还小,只需用简便的汽车棚作机房,能耗率为0.93%。

**基本构造** 同步调相机主要由定子机座、定子铁芯、定子绕组、转子转轴、磁极铁芯、励磁绕组、阻尼绕组、集电环、励磁装置及通风冷却装置等部分构成。与同步电动机相比,由于它不带机械负载,而在电网故障电压下跌时需供应大量无功,所以其转轴轴颈较细,励磁绕组及励磁装置的容量较大,励磁损耗较多,通风冷却装置需相应加强。同步调相机的转子通常为凸极式,6~8极,极面一般装有全阻尼笼,以便非同步启动。使用较多的一种中型氢冷调相机的剖面结构如图所示。



氢冷调相机剖面结构图

**用途** 同步调相机的主要用途是:①用于大用户及高、中压变电所,以改善功率因数及电压质量。但目前已逐渐被运行方便、损耗少的自动投切电容器组加有载调压变压器所代替。②用于钢铁企业等冲击负荷用户,配以快速励磁及高强行励磁倍数,以补偿冲击无功负荷,减少母线电压闪变。但由于同步调相机的响应速度较慢,也已逐渐被静止补偿装置所替代。③用于超高压电网的枢纽变电所及受端变电所,以补偿线路及地区所需的无功,控制正常及事故情况下的电网电压,提供短时应急无功电源,加强对地区电网在动态过程中的电压支撑,从而提高系统稳定性。④用于远距离输电线路的中间变电所,以提高系统的稳定性,增大输电线路的输电能力,减少故障后电压及功率振荡。⑤用于高压直流输电系统,以供给换流站所需的部分无功。当受端交流电网的短路容量与直流输电功率之比(即短路比)小于2.5时,为增强交流母线电压的稳定性,保证换流阀所需的换相无功,必须安装同步调相机,其容量至少应使调相机接入后的短路比高于2.5~3.0。

**发展简况** 同步调相机自1913年在美国南加利福尼亚爱迪生公司(Southern California Edison Co.)电网开始使用以来,已有70多年的历史。早期容量小,都是空冷型的,主要供改善功率因数用。其后为了提高容量,减少损耗,1928年在美国特纳(Turner)变电所投入第一台20 MV·A氢冷调相机;1971年瑞典

ASEA公司试制成一台345 MV·A全水内冷调相机,在美国杜蒙变电所投入运行。中国调相机发展较迟,20世纪50年代末开始制造少量空冷调相机;1978年试制成功第一台60 MV·A氢冷调相机,于1982年在长沙梨梨变电所投入运行。随着静止补偿装置的迅速发展和良好的使用效果,国际大电网会议认为,将来除少数特殊情况外,静止补偿装置将取代同步调相机。

#### 参考书目

Miller T J E. Reactive Power Control in Electric Systems. New York: John Wiley & Sons, 1982

Baltusberger K. Synchronous Compensator Rated 160 MV·A. In: Brown Boveri Review, Vol. 61, 1974

(马延绪)

tongou tiaoxiangji guzhang

**同步调相机故障** (synchronous condenser failures)

导致同步调相机保护动作跳闸、报警或必须强迫停机的设备内部故障。同步调相机故障主要有定子绕组故障、定子铁芯故障、转子绕组故障、转子机械性故障、冷却系统故障、励磁系统故障及其它类故障。

(1) 定子绕组故障。主要包括:①主绝缘击穿、单相接地。可能导致的原因有:绝缘老化;线棒在槽部或端部固定不牢,产生磨损或电腐蚀;槽口铁齿压装不紧,导致振动磨坏线棒绝缘;嵌线或检修不当,损伤了主绝缘;绝缘表面遗留磁性粒屑,在磁场中振动引起绝缘钻坏;防晕处理不当;匝间或排间股线短路扩大;线股间绝缘老化脱落,股线振动磨坏主绝缘内壁;铁芯局部短路过热烧坏主绝缘;过电压保护不当;水内冷调相机漏水;空心导线阻塞过热;氢冷调相机滑环小室与主机之间的氢气过滤装置失灵,电刷粉末附着在主绝缘上等。②相间短路。可能导致的原因有:单相接地或匝间短路扩大;绕组端部固定不牢普遍磨损;端部接头开焊引起闪络;水内冷调相机端部漏水或转子甩水等。③匝间短路。④接头焊接不良烧焦。⑤线棒温升过高。可能导致的原因有:冷却系统故障、阻塞;股间短路;电腐蚀;受铁芯严重短路影响等。⑥水内冷调相机定子空心导线、接头或绝缘引水管漏水。

(2) 定子铁芯故障。包括片间短路、定子铁芯严重发热、甚至烧熔。可能导致的原因有:制造或检修不当,铁芯遭到机械损伤;金属物落在定子膛内造成片间短路;片间绝缘老化;电阻检温计绝缘损坏导致部分铁芯短路。

(3) 转子绕组故障。包括励磁绕组一点接地、二点接地短路,或严重匝间短路;水内冷励磁绕组漏水、阻

塞过热和阻尼绕组烧坏、断裂等。

(4) 转子机械性故障。包括零部件断裂飞逸引起强烈振动或撞击声等。

(5) 冷却系统故障。包括冷却器严重漏水无法隔绝;水内冷调相机断水或水系统阻塞;氢冷调相机严重漏氢等。

(6) 励磁系统故障。如由于励磁系统内故障造成调相机失磁、滑环严重冒火等。

(7) 其它故障。如轴承损坏,严重振动,冒烟、着火,发生氢爆炸等。

(马延绪)

tongbu tiaoxiangji jidian baohu

**同步调相机继电保护** (synchronous condenser relay protection)

同步调相机故障或异常运行时,为减轻其损坏程度和对系统的影响而采用的动作于跳闸或信号的自动保护装置。调相机的内部短路保护和接地保护与同容量发电机的保护相同,通常装设纵联差动保护和横联差动保护(如定子绕组有两个并联分支)作为定子绕组的相间短路和匝间短路保护。如调相机母线的单相接地电流不小于5A时,再加装动作于跳闸的单相接地保护;如调相机母线的单相接地电流小于5A时,则可利用动作于信号的母线绝缘监察装置作为接地保护。除此之外,调相机的继电保护还有以下特点:

(1) 不允许全电压起动的调相机,需装设长时限低电压保护,以防止电源电压消失、调相机停转、再次出现电压时调相机在不经起动装置的情况下全电压直接起动。一般该保护的動作电压为额定电压的40%,動作时限为10s。该保护动作后将调相机切除,并使其处于准备起动状态。(见同步调相机起动方法)

(2) 调相机不装设防止外部故障的过电流保护,以保证系统故障时调相机能送出大量无功而不致被误切除。

(3) 调相机需装设过负荷保护,以防止系统电压不能恢复时调相机过负荷太久。过负荷保护动作于减励磁或发信号。

(4) 同步调相机的失磁保护与同步发电机的保护不同,它是根据励磁电流与机端电压的组合逻辑动作的。当励磁电流等于零,机端电压正常时,失磁保护不动作,因为这正是调相机正常吸收无功的运行方式;当励磁电流等于零,机端电压同时下跌时,说明调相机真的失磁,失磁保护才动作将调相机切除。

(5) 调相机需根据系统具体情况考虑装设有功方向保护或低频保护,以防止外来电源跳闸后,调相机有功反馈,而导致与其相连的馈线上的按频率减负荷装

置误跳闸。但对于多电源的变电所,则不一定需要此类保护。

(6) 调相机装设有转子绕组一点接地保护,该保护动作于信号。

**参考书目**

能源部西北电力设计院, 电力工程电气设计手册 (电气二次部分), 北京: 水利电力出版社, 1991

(马延绪)

tongbu tiaoxiangji jianxiu

**同步调相机检修** (synchronous condenser maintenance and overhaul)

按规定定期对同步调相机进行停机检查和修理,使之经常处于良好的技术状态。同步调相机的检修内容主要包括定子部分、转子部分、冷却系统部分、轴承和油系统部分、励磁系统部分及其他部分等六个方面。

(1) 定子部分。检查和清扫定子绕组端部、通风沟、槽楔、铁芯、出线套管和灭火装置等;对氢冷调相机进行整体风压试验;对水内冷调相机进行通水反冲洗及水压试验。

(2) 转子部分。测量空气间隙,抽出转子对其各部进行检查与清扫。对用全压或降压方法起动的调相机,还需着重检查其阻尼绕组有无接触不良、过热变色和烧坏等情况。对氢冷调相机还需加强对滑环、电刷、氢气过滤装置和主机绝缘的检查与清扫,这是因为:①滑环与电刷在氢气中运行比在空气中磨损快,除非采取有效措施(如用铜镁合金制造的滑环和含氟聚合物的电刷等);②冷却滑环后的氢气是通过氢气过滤装置排向机壳内的,万一过滤失灵,磨损粉末必将影响主机绝缘。

(3) 冷却系统部分。检查和清扫冷却器与冷却系统。

(4) 轴承和油系统部分。检查轴承、油档、油系统和氢冷调相机的密封环与密封盘。

(5) 励磁系统部分。测量励磁机空气间隙,抽出转子对定、转子各部分进行检查与清扫,修刮打磨整流子,检查并调整电刷压力及中心位置,及时更换电刷等;检查和试验半导体励磁系统。

(6) 其他。进行各项预防性试验和仪表、继电保护、自动安全监控检测装置、自动与远动装置等的检查、校验与测试,同时对附属设备进行检修。

(马延绪)

tongbu tiaoxiangji lilai

**同步调相机励磁** (synchronous condenser excitation)

供给同步调相机转子绕组的励磁

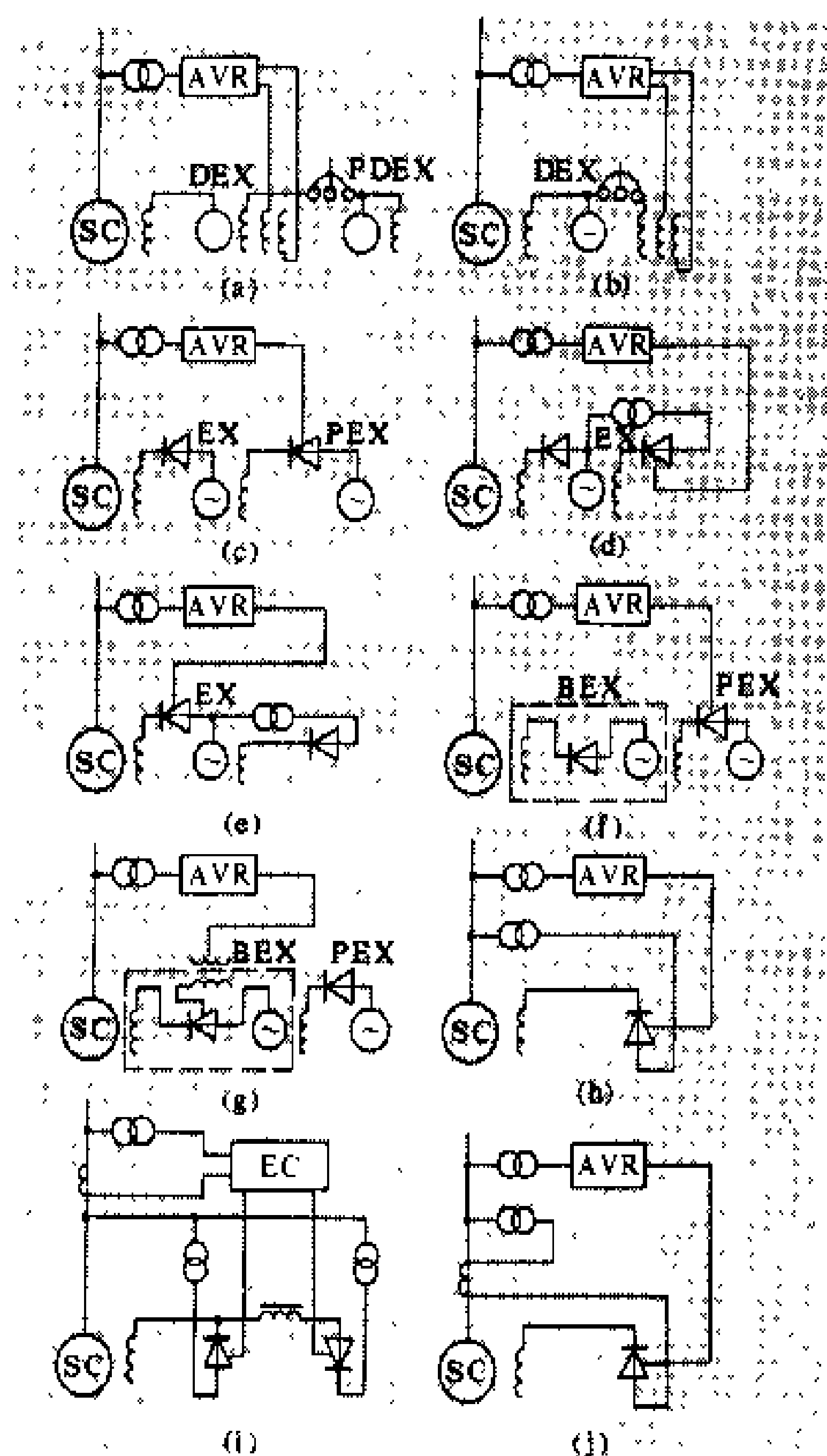
电流以建立磁场的系统，包括励磁电源和自动电压调节器等。在正常情况下，用来供应并自动调节调相机所需励磁，以控制母线电压，改善功率因数。当电力网发生短路故障时，可通过自动励磁调节对调相机实行强行励磁，以支撑母线电压，提高电网的稳定性。因此，同步调相机励磁系统需要有较大的顶值电压倍数（通常为 1.5~2.5，特殊设计为 4~5）和较高的励磁响应比（一般为 1.5~2.0，晶闸管励磁为 2.5~3.5）。同步调相机的励磁方式可分为他励和自励两大类。他励包括直流励磁机励磁、交流励磁机静止整流器励磁和交流励磁机旋转整流器励磁（通称无刷励磁）；自励包括自并励晶闸管励磁和自复励晶闸管励磁等。励磁方式的选择取决于电网对励磁参数的要求、经济性、可靠性、维护方便性、调相机起动方式、是否负励磁来增加吸收无功能力以及厂房布置尺寸等因素。

**直流励磁机励磁** 直流励磁机多与调相机同轴，有他励和自并励两种，如图 (a)、(b) 所示。调相机励磁电流由直流励磁机通过整流子、电刷和电刷、集电环供给。励磁调节由自动电压调节器 (AVR) 控制直流励磁机主极上附加的控制绕组来实现。其优点是可改变直流励磁输出电压的极性以实现负励磁。如容量足够，直流励磁机还可兼作起动电动机用，美国有几台 250MV·A 的调相机就是用同轴励磁机起动的。缺点是维护工作量大，可靠性较差，还需增加调相机的轴系和机壳长度。

**交流励磁机静止整流器励磁** 调相机励磁电流由交流励磁机发出的交流电，经不可控 [见图 (c)、(d)] 或可控 [见图 (e)] 的静止整流器整流后，再通过电刷、集电环供给。其共同的优点是取消了机械整流子，运行简便可靠。可控的励磁方式还有励磁响应比高以及可利用晶闸管的逆变运行实现快速灭磁的优点。不可控的励磁方式缺点是励磁系统时间常数较大，励磁响应比低；可控的励磁方式缺点是励磁机与晶闸管容量大，造价较高。

**交流励磁机旋转整流器励磁** 即无刷励磁。旋转整流器也有不可控和可控两种，分别如图 (f)、(g) 所示。它与静止整流器励磁的根本区别是：励磁机的电枢与整流器都是装在转轴上的，输出的直流不经滑环直接引向调相机转子绕组。其突出优点是基本无需维护。

**自并励晶闸管励磁** 调相机的励磁电流由接在机端的励磁变压器经晶闸管整流后供给，如图 (h)、(i) 所示。其中图 (i) 是具有正向和负向励磁的接线示意图，可实现负励磁运行。其共同的优点是结构简单可靠，造价低，励磁响应比高，能快速灭磁，噪声小，不增加机轴和机壳长度，因而得到较广泛的应用。缺点是当调相机近端发生短路故障时会降低强励倍数。



同步调相机的各种励磁方式图

- (a) 直流励磁机励磁 (他励); (b) 直流励磁机励磁 (自励); (c) 交流励磁机静止励磁 (他励); (d) 交流励磁机静止励磁 (自励); (e) 交流励磁机静止晶闸管励磁; (f) 无刷励磁; (g) 无刷晶闸管励磁; (h) 自并励晶闸管励磁; (i) 自并励正负向晶闸管励磁; (j) 自复励晶闸管励磁 (交流侧串联式)

SC—同步调相机; AVR—自动电压调节器; DEX—直流励磁机; PDEX—直流副励磁机; EX—交流励磁机; PEX—交流副励磁机; BEX—无刷励磁旋转部分; EC—电子控制器

**自复励晶闸管励磁** 调相机的励磁电流由接在机端的励磁变压器与电流变电压的串联变压器串联输出的交流，再经晶闸管整流后供给，如图 (j) 所示。其优点是当调相机近端发生短路故障时，由于串联变压器输出的增大，强励倍数不会降低；此外，还可减轻励磁调节器的负担。缺点是串联变压器体积大，造价高，安装布置不太方便。

#### 参考书目

李基成. 现代同步发电机整流器励磁系统. 北京: 水利电力出版社, 1987

Glebov I. A. Synchronous Condensers, Their Excitation and Regulation Systems. In: CIGRE PROC.

tongbu tiaoxiangji qidong fangfa

# 同步调相机起动方法 (synchronous condenser starting methods)

将同步调相机从静止状态升速到接近额定转速以并入电网的技术过程。常用的起动方法有全电压起动、电抗器降压起动、自耦变压器降压起动、升压变压器抽分接头降压起动、起动电动机起动和变频起动六种。选择起动方法时需考虑设备投资、起动引起的母线压降与对调相机的冲击等因素。为了减少调相机起动阻力,大多采用向轴承供高压油将轴顶起的方法。同步调相机的起动操作通常是全自动或半自动的。

全电压起动 接线如图 1 (a) 所示。起动前励磁机磁场变阻器 1 放在对应于调相机空载额定电压位置; 起动时合上断路器 2, 调相机即起动升速, 平稳地牵入同步。其优点是: 不需额外投资, 操作简单可靠, 自动牵入同步。缺点是: 起动电流很大, 将引起较大的母线压降; 调相机的定子绕组和阻尼绕组将受到很大的机械应力和热应力的作用。全电压起动方法一般适用于小型调相机。

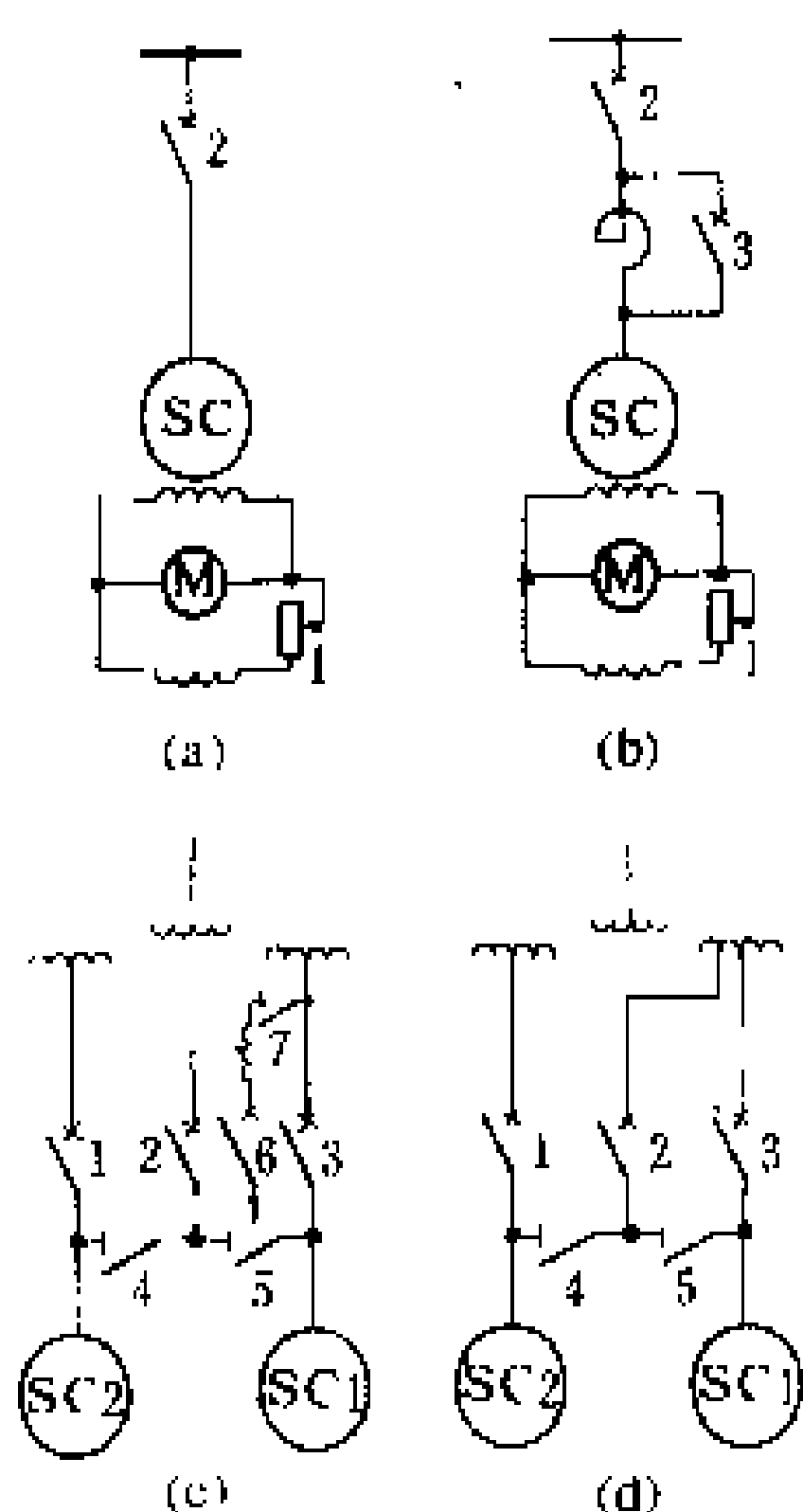


图 1 调相机全压、降压起动接线图

(a) 全电压起动; (b) 电抗器降压起动; (c) 自耦变压器降压起动; (d) 升压变压器抽分接头降压起动

电抗器降压起动 接线如图 1 (b) 所示。起动前励磁机磁场变阻器 1 放在对应于调相机空载额定电压位置, 断路器 2、3 断开。起动时合上断路器 2, 调相机即通过电抗器降压起动。当转速接近额定值时, 由于定子电流的减少、转子电流及机端电压的升高, 调相机很快被牵入同步, 使定子电流及电抗器压降减至最小, 最后合上断路器 3, 起动操作即告完成。也有在起动前将调相机转子闭合在电阻值等于 5~8 倍转子电阻的灭磁电阻上起动。这种方法的优点是: 投资少, 操作简单可靠, 自动牵入同步; 对电网和调相机的冲击可适当减少; 合断路器 3 时不会引起第二次冲击。缺点是: 在同样起动转矩下, 对电网的冲击比用自

耦变压器降压起动的要大。电抗器降压起动方法一般用于中、小型调相机。

自耦变压器降压起动 图 1 (c) 所示为二台调相机合用一台自耦变压器起动的接线, 一般可将电压降到 35%~50%。调相机从降压起动过渡到全压运行有闭路切换和开路切换两种过渡方式。

闭路切换特点是切换时调相机始终保持与电网连接。起动前 (如起动 SC1) 隔离开关 5、7 合上, 4 断开, 断路器 1、2、3 断开, 6 合上; 起动时合上断路器 2, SC1 即在降压下起动。当 SC1 达到满速时, 加励磁并跳开断路器 6, SC1 通过自耦变压器的串联绕组牵入同步。最后合上 3, 断开 2 及 7, 起动操作即告完成。

开路切换特点是切换时调相机短时与电网断开。断路器 6 可省去。当 SC1 在降压下达到满速时, 加励磁将 SC1 拉入同步, 再经无功功率继电器检测证实同步极性正确无误后, 跳开断路器 2, 同时对 SC1 进行强励, 以迅速提高机端电压, 减少断路器 3 两端的电压差, 经适当延时后电压差接近最小值时, 合上 3, 断开 7, 起动操作即告完成。

这种方法的优点是: 在同样的起动转矩下, 对电网的冲击比电抗器降压起动的要小。缺点是: 投资比较大, 操作较复杂; 合断路器 3 时有第二次冲击。自耦变压器降压起动方法适用于容量小于 170 MV·A 的大中型调相机, 对容量大于 170 MV·A 的大型调相机, 起动绕组难以适应。

升压变压器抽分接头降压起动 接线如图 1 (d) 所示。起动操作步骤与自耦变压器降压起动的开路切换法基本相同。这种方法的主要优点是投资省, 其余优缺点及适用范围与自耦变压器降压起动法基本相同。

起动电动机起动 通常用一台极数比调相机少两极的绕线式转子电动机 (或同轴励磁机当电动机用) 将调相机升速, 当调相机的转速接近额定转速时, 对调相机加励磁, 最后用准同步法并网。其优点是: 起动平稳, 对电网及调相机基本无冲击, 调相机的定子绕组及阻尼绕组不需加强设计; 若采用同轴励磁机起动, 则能节省投资。缺点是: 操作较复杂; 要增加调相机轴和机壳的长度; 若采用起动电动机起动, 其投资较大。起动电动机起动方法适用于大中型调相机。

变频起动 接线如图 2 所示。起动时对调相机加适当励磁, 并用晶闸管变频装置向调相机供电。变频装置从零开始逐步提高输出频率, 调相机即起动并与变频装置的输出频率同步升速; 在低速阶段, 当调相机尚未建立起足够的反电动势时, 借控制电源侧整流器迫使直流电流断续变化来对逆变器进行换流; 当升到额定转速时, 用准同步法并网。这种方法的优点是: 起动平稳, 对电网及调相机无冲击, 调相机的定子绕组及阻

尼绕组不需加强设计；可以几台调相机合用一套变频  
起动装置，并且便于维护。缺点是：投资大（但若一套  
变频起动装置供几台调相机合用，则投资可相对降  
低），操作较复杂。变频起动方法仅适用于大型调相机。

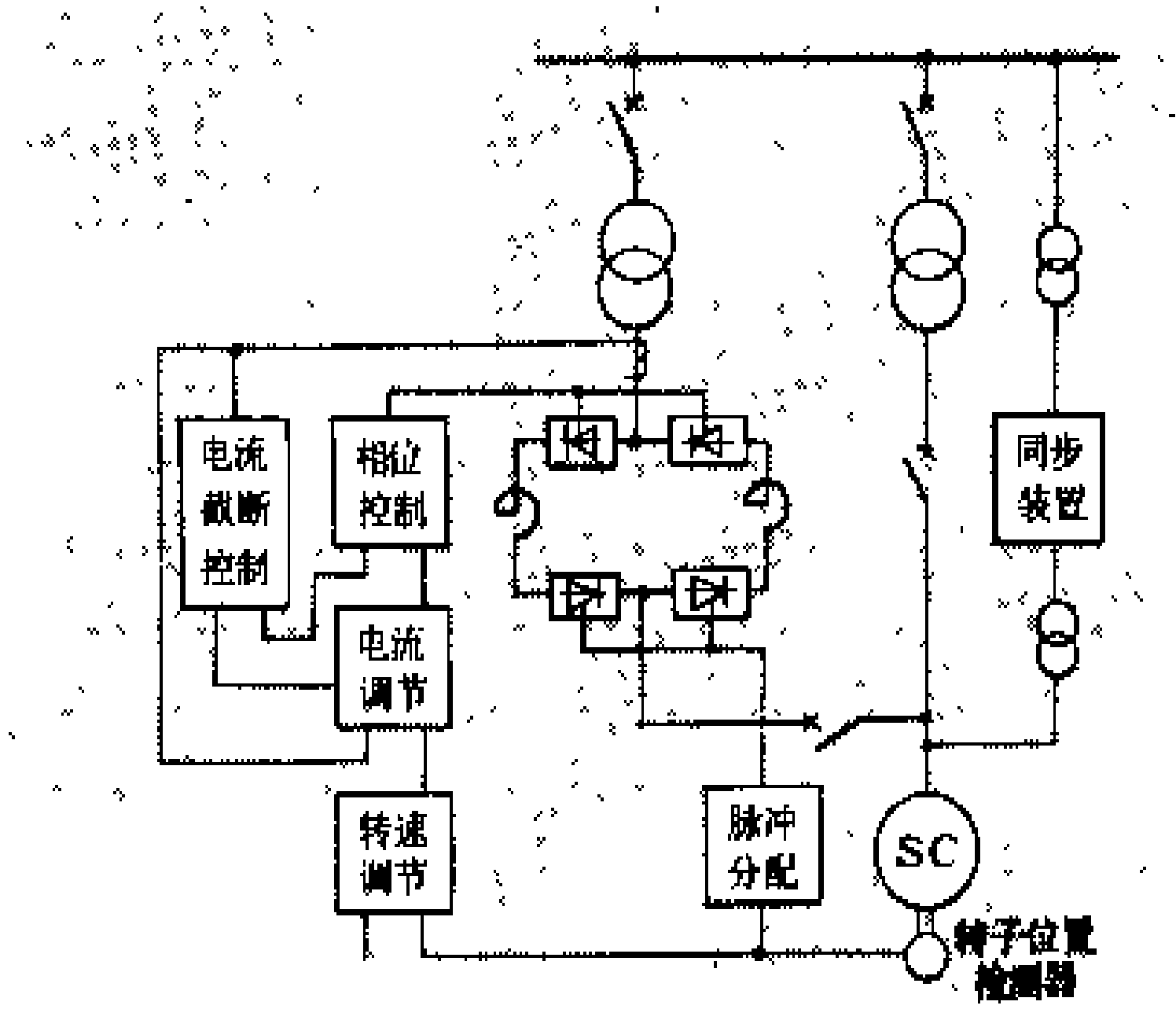


图 2 调相机变频起动接线图

参考书目

Miller T J E. Reactive Power Control in Electric  
Systems. New York: John Wiley & Sons , 1982

Brown P G. Reduced Voltage Starting Performance  
of Synchronous Condensers and Pumped Hydro  
Units. In: Trans. IEEE. 505~511, 1976

(马延绪)

tongbu tiaoxiangji shiyan

**同步调相机试验** (synchronous condenser  
tests) 在同步调相机的制造、出厂、交接、运行  
和检修中,为检验其性能与质量,以保证安全经济运行  
所进行的各项试验。按试验的不同性质可分为型式试  
验、出厂试验、交接试验、大修中试验及运行中预防性  
试验。根据国际电工委员会 (IEC) 和中国国家及部颁  
标准、规程的规定,同步调相机的试验和检查项目如表  
所示。

同步调相机的试验和检查项目

序号	项 目	型式 试验	出厂 试验	交接 试验	大修 试验	预防性 试 验	备 注
1	空载特性测定	✓	✓	✓	✓		无起动电动机不试
2	稳态短路特性测定	✓	✓	✓	✓		无起动电动机不试
3	V 形曲线测定	✓	✓	✓	✓		
4	效率测定	✓	✓				
5	短时过电流试验	✓					
6	突然短路机械强度试验	✓					
7	电压波形正弦畸变率和电压谐波因数测定	✓					
8	额定励磁电流和电压调整率的测定	✓	✓				
9	温升试验	✓	✓	✓			必要时
10	定子铁芯的损耗发热试验	✓	✓	✓			修理铁芯后
11	转子动平衡和超速试验	✓	✓				
12	噪声的测定	✓	✓				
13	异步起动时起动转矩和起动电流的测定	✓					
14	绕组电抗和时间常数测定	✓	✓	✓			
15	绕组冷态直流电阻测定	✓	✓	✓	✓		出口短路后
16	定子绕组绝缘电阻和吸收比测定	✓	✓	✓	✓	✓	
17	定子绕组直流耐压试验及泄漏电流测定	✓	✓	✓	✓	✓	
18	定子绕组交流耐压试验	✓	✓	✓	✓		
19	短时升高电压试验	✓	✓	✓			
20	转子绕组绝缘电阻测定	✓	✓	✓	✓	✓	
21	转子绕组交流耐压试验	✓	✓	✓	✓		
22	励磁回路连同所连设备绝缘电阻的测定			✓	✓	✓	
23	励磁回路连同所连设备的交流耐压试验			✓	✓	✓	
24	轴承绝缘电阻测定	✓	✓	✓	✓		
25	灭磁电阻器直流电阻测定		✓	✓	✓		
26	灭磁开关并联电阻的测定		✓	✓	✓		
27	转子绕组交流阻抗和功率损失的测定	✓	✓	✓	✓		
28	轴电压测定	✓	✓	✓	✓		

续表

序号	项 目	型式 试验	出厂 试验	交接 试验	大修 试验	预防性 试 验	备 注
29	埋入式检温计绝缘电阻测定和温度误差校验	✓	✓	✓	✓		
30	相序检查	✓	✓	✓			改动接线后
31	定子开路时灭磁时间常数和灭磁后残压的测定	✓	✓	✓			更换开关后
32	定子单线棒 tgδ 测定	✓	✓				更换绕组时
33	定子与转子间气隙测定	✓	✓	✓	✓		
34	气体冷却器的水压试验	✓	✓	✓	✓		
35	机械检查并测定轴承油温和振动	✓	✓	✓	✓	✓	
36	氢冷调相机的气密试验	✓	✓	✓	✓		
37	氢气控制系统的工作情况检查	✓	✓	✓	✓	✓	
38	漏氢量测定	✓	✓	✓	✓		
39	水冷调相机定子内总进、出水管绝缘电阻测定	✓	✓	✓	✓	✓	
40	定子绕组和转子绕组耐水压试验和流量检查	✓	✓	✓	✓		
41	绕组冷却水系统工作情况检查	✓	✓	✓	✓	✓	
42	不对称负载试验	✓					特殊要求时
43	负励磁试验	✓					特殊要求时

(马延绪)

tongbu tiaoxiangji yunxing kongzhi

**同步调相机运行控制** (synchronous condenser operation and control) 为保证同步调相机的安全经济运行而进行的设备起停操作和负荷调节、运行中的仪表监视和记录、巡回检查、定期维护和测试、异常运行和事故处理等工作。具体工作内容按制造厂的规定和有关运行规程的规定来确定。

对有人值班的调相机，其运行控制的一般做法是：  
(1)通常的起停操作按调度指令由值班人员执行，负荷调节按预定的调度曲线由励磁调节器自动或手动调节。起动前要对调相机及其附属设备进行外部检查，测量定子、励磁回路及起动设备的绝缘电阻，试验断路器分合闸及联锁动作等。起动操作通常是全自动或半自动的。起动后达到额定转速时，要检查轴承油流温度和轴瓦温度、氢冷调相机的氢气压力、油压和水内冷调相机的水压、流量及检漏计等，在一切正常的情况下再合闸并网。对调相机加负荷的速度一般不受限制。在正常情况下将调相机从电网中解列前，要先减去调相机的负荷。

(2)仪表监视和记录，目的是为了尽早发现运行偏差和异常情况，及时予以处理，并为以后的定期运行分析提供资料。监视和记录内容包括定子和转子电流、电压、功率，定子绕组、铁芯、进出风和轴承的温度，氢冷调相机的氢气纯度、温度、压力，以及水内冷调相机的冷却水导电率、温度、压力、流量、检漏计等。

(3)巡回检查运行中的设备是否处于良好状态，以便及早发现故障，进行处理。检查内容包括调相机及其

附属设备外部、滑环、整流子、电刷、励磁装置、氢冷调相机的氢系统和水内冷调相机的水冷系统的运行情况等。

(4)定期维护和测试，使设备保持良好状态，各项保护装置动作灵敏可靠。内容包括定期清扫滑环、整流子、氢气过滤器、冷却水滤网、冷却器等；及时更换电刷、氢气干燥剂、冷却水离子交换树脂；定期对氢、油、水系统取样进行分析化验，及时采取措施；定期测试各项保护装置和测定机壳漏氢量等。

(5)异常运行和事故处理。在电力系统发生事故时，允许调相机按制造厂或规程规定进行强行励磁和短时过负荷；当调相机本身发生冒烟、着火、氢气爆炸、剧烈振动和威胁人员生命等危急情况时，要立即停机；遇一般异常运行情况时，要迅速按规程查明原因并设法处理，必要时可停机；遇保护动作跳闸时，按事故处理规程处理。

在工业发达国家，同步调相机的运行大多无人值班，并实现了自动化，起停操作和电压水平都可遥控，仪表监视和记录、巡回检查、异常运行和事故处理等工作采用自动安全监控检测装置和少量的远动装置来完成。平时只需定期进行必要的巡回检查、维护和测试工作。

(马延绪)

turang dianzulu

**土壤电阻率** (earth resistivity) 单位体积的正立方体相对两面间土壤的电阻，单位为欧米(Ω·





V xing geli kaiguan

**V 型隔离开关**（V type disconnecting switch）由两个呈 V 型布置的绝缘支柱组成的隔离开关。其导电活动臂结构与双柱水平旋转式隔离开关（见双柱式隔离开关）的相同，也是借助于两个支柱的转动来完成隔离开关的开断和闭合操作。由于两个支柱共用一个底座，因此简化了隔离开关的结构和安装支架。其结构示意图如图所示。

V 型隔离开关结构简单，操作灵巧，属于轻型电气

V 型隔离开关

装置，在 35~110 kV 配电装置中应用广泛。在 220 kV 及以上的配电装置中，由于受支柱绝缘子强度的限制，难于将两个绝缘支柱布置成 V 型结构，所以一般不用 V 型隔离开关。

（蓝增珏）





waijueyuan

**外绝缘** (outside insulation) 与大气直接接触的绝缘部件,如暴露在空气中的瓷套管表面,变电所内的空气间隙等。外绝缘的耐受电压值与大气条件(气压、气温、湿度、雾、雨、冰、雪等)密切相关。沿面闪络和气隙击穿是外绝缘丧失绝缘性能的常见形式,但事后能自动恢复其绝缘性能,故属自恢复型绝缘。

(方 瑜)

wanggefa

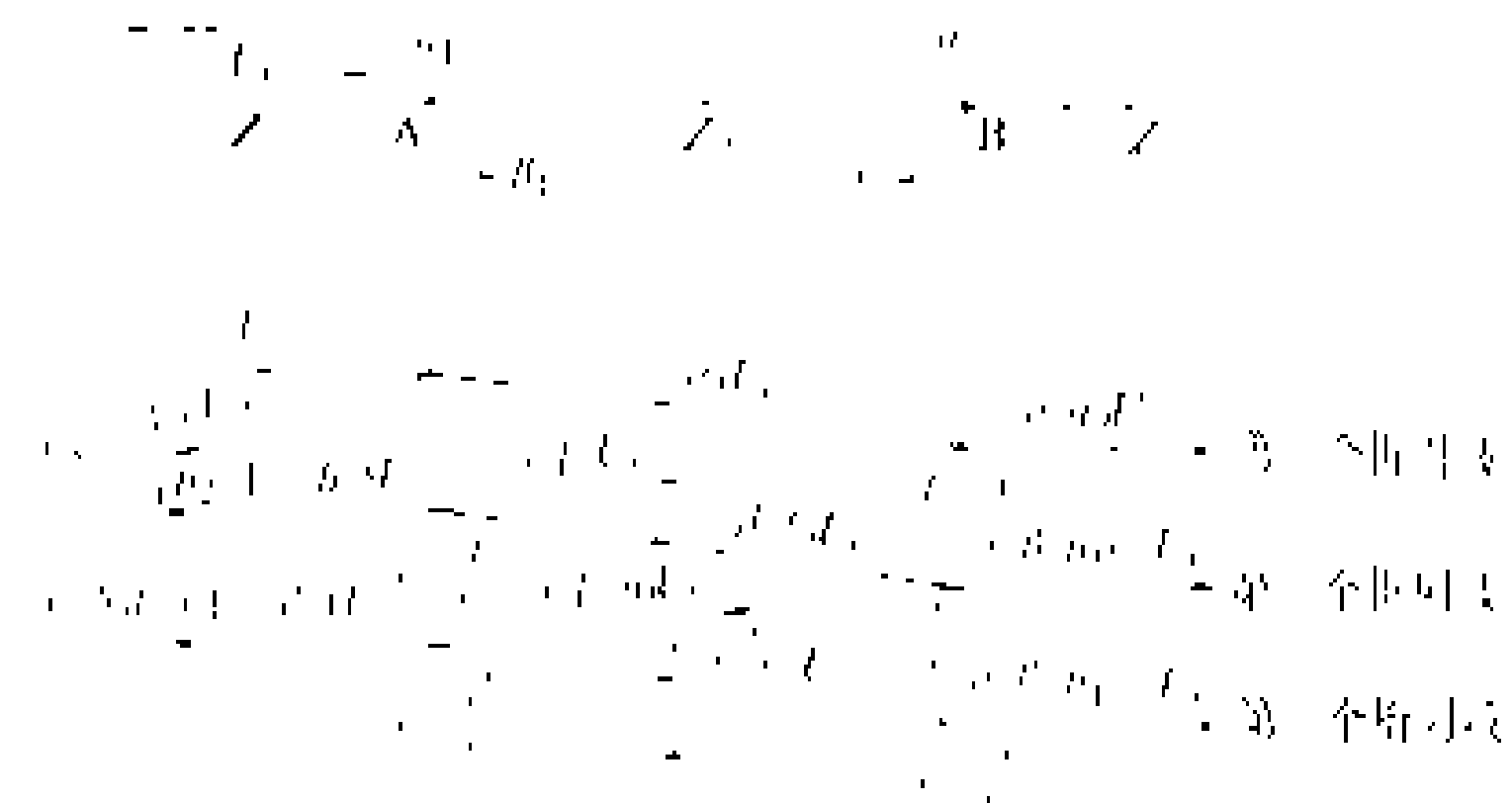
**网格法** (lattice diagram method) 用网格图将行波在结点上的各次折射、反射情况按时间先后标出,以求取结点在不同时刻的电压值的方法。常用于过电压计算。图示为计算串联三导线波过程中B点电压的网格图。自左向右串联的三导线的波阻抗分别为 $Z_1$ 、 $Z_0$ 、 $Z_2$ 。沿 $Z_1$ 向A点传播的入射波 $U_0$ ,经A点折射为沿 $Z_0$ 由A点向B点传播的前行波 $\alpha_1 U_0$ , $\alpha_1 = 2Z_0 / (Z_1 + Z_0)$ 。 $\alpha_1 U_0$ 在 $t=0$ 时到达B点,在B点折射后形成第一个沿 $Z_2$ 由B点向前传播的折射波 $\alpha_1 \alpha_2 U_0$ , $\alpha_2 = 2Z_2 / (Z_0 + Z_2)$ 。由B点反射后向A点传播的反行波为 $\alpha_1 \beta_2 U_0$ , $\beta_2 = (Z_2 - Z_0) / (Z_2 + Z_0)$ 。 $\alpha_1 \beta_2 U_0$ 在 $t = \frac{l}{v_0}$ 时到达A点( $v_0$ 为波在波阻抗为 $Z_0$ 的线路上传播时的波速, $l$ 为线路AB的长度),再由A点反射为向B点传播的前行波 $\alpha_1 \beta_2 \beta_1 U_0$ ,其中 $\beta_1 = (Z_1 - Z_0) / (Z_1 + Z_0)$ 。 $\alpha_1 \beta_2 \beta_1 U_0$ 在 $t = \frac{2l}{v_0}$ 的时刻到达B点,在B点折射形成第二个沿 $Z_2$ 由B点向前传播的折射波 $\alpha_1 \beta_2 \beta_1 \alpha_2 U_0$ 。仿此可写出B点在 $t = \frac{4l}{v_0}$ 时出现的第三个折射波 $\alpha_1 \beta_2^2 \beta_1^2 \alpha_2 U_0$ 以及 $t = \frac{2nl}{v_0}$ 时出现的第 $n+1$ 个折射波 $\alpha_1 \beta_2^n \beta_1^n \alpha_2 U_0$ 。每个折射波出现的时间间隔 $\Delta t = 2l/v_0$ ,为波在波阻为 $Z_0$ 的线路上往返一次所需的时间。

根据网格图所写出的结点B在不同时刻的电压为

$$\begin{aligned} 0 \leq t < \frac{2l}{v_0} \text{ 时, } U_B &= \alpha_1 \alpha_2 U_0 \\ \frac{2l}{v_0} \leq t < \frac{4l}{v_0} \text{ 时, } U_B &= \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_1 \beta_2) U_0 \\ &\dots\dots \\ \frac{2(n-1)l}{v_0} \leq t < \frac{2nl}{v_0} \text{ 时, } \\ U_B &= \alpha_1 \alpha_2 [1 + \beta_1 \beta_2 + (\beta_1 \beta_2)^2 + \dots + (\beta_1 \beta_2)^{n-1}] U_0 \\ &\dots\dots \end{aligned}$$

仿此,也可求出结点A在不同时刻的电压。

网格法也可用来计算诸如三个以上不同波阻抗导线串联以及结点上有多根不同波阻抗导线的复杂网络中的多次折射与反射结果。用网格法计算复杂网络时,为了能清晰地表示出结点在不同时刻的电压值,宜用相应的表格来取代网格图。时间间隔 $\Delta t$ 的选取应能整除波在各个传输线上的传播时间,使波到达结点发生折射、反射的时刻刚好和时间间隔 $\Delta t$ 的整数倍相符。加在系统上的电压波形也应按时间间隔 $\Delta t$ 划分,即划分成按时间间隔 $\Delta t$ 顺序加入的各阶跃电压之和。为使按时间间隔所划分的电压波形尽可能接近实际波形, $\Delta t$ 除了应当能够整除波在各个传输线段上的传播时间外,还必须足够小。复杂网络的填表工作可借助计算机用专门的程序来完成。



计算波的多次折射、反射的网格图

(陈慈董)

wangluo shiyanzhan

**网络试验站** (network high power testing station) 以运行中的电力系统为电源,通过人工短路,利用短路容量进行试验的大功率试验设施。通过专用短路变压器、调节电抗器、选相合闸开关给出试验电流,其试验条件真实,可进行多种特殊条件下的试验,如开断发展性故障、开合空载线路、开合空载变压器、开合电容器组等试验。网络试验站的试验能力随电力系统容量的扩大而不断增长,它所需的投资比相同

试验能力的冲击同步发电机试验站约少一半,但试验能力受电力系统正常运行的限制,大容量试验只能在电力系统的低负荷期间进行,恢复电压的上升速度受电力系统运行方式的影响,不能调高。网络试验站又可充作合成回路(见大功率试验方法)的电流源。网络试验站大都建在大容量变电所附近。

**短路变压器** 用以获得多级电压下的大电流。其短路阻抗小(2%~4%),机械强度高,二次侧有多个绕组。一般将多台单相变压器串、并联以得到多级的单相或三相电压和电流。短路变压器容量的选择应根据电力系统15~20年的发展规划确定。

**调节电抗器** 用以调节试验电流。为保持电感恒定,多采用空气式,一般装于短路变压器二次侧。调节电抗器可以是无抽头的,也可以是多抽头的。无抽头的所需台数多,但便于操作自动化。

**选相合闸开关** 用以控制试验电路闭合时的相位,以调节试验电流中的直流分量,缩短试验过程,通常无灭弧装置,不能开断短路或负荷电流。目前选相合闸开关的合闸电流可做到100 kA,合闸时间偏差不大于±0.3 ms。

**发展情况** 1949年,法国电力公司在丰特奈(Fontenay)建立了世界上第一个网络试验站。到60年代,各国相继建立了许多网络试验站,如加拿大的魁北克水电局研究所大功率实验站、意大利电工技术试验中心大功率实验站、苏联北方大功率实验站、法国的雷纳第大功率实验站,以及中国沈阳高压开关厂的虎石台实验站。80年代以来,网络试验站的主设备规模和水平无多大变化,但在试验自动化和数据测量处理技术方面发展很快。

(顾克鸿)

weixianbo quxian

**危险波曲线** (curve of dangerous waves)

变电所能耐受的最大侵入波幅值与陡度的关系曲线,用 $U_m=f(a)$ 表示。式中 $U_m$ 为变电所的侵入波幅值,kV; $a$ 为侵入波陡度,kV/m。如图所示,若侵入波参数(幅值、陡度)处在曲线的右上方(图中的斜线区),则该变电所将有因雷害而损坏电气设备绝缘的危险。

危险波曲线可用来判定变电所出线在临近变电所有多长的线段上发生绕击或反击时会使变电所发生雷害事故,从而算出变电所的耐雷指标(即平均多

少年发生一次雷害事故),以便采取有效措施提高耐雷指标。

变电所的危险波曲线可用计算或模拟试验的方法求出,具体做法是:在某一运行方式下,固定侵入波的幅值,改变其陡度,直到变电所某一选定的计算点上的电压达到设备的冲击耐压值为止,记下这一侵入波的幅值与陡度作为危险波曲线上的一点;然后改变侵入波幅值,重复上述过程,得到一系列点,连成曲线即得危险波曲线。危险波曲线的计算点一般可选在最重要的设备处,或受避雷器保护最差的设备处,或绝缘较弱的设备处,例如电力变压器,线路隔离开关以及母线上各终端处的电器。

(陈慈莹)

wushan

**污闪** (pollution flashover) 污秽闪络的简称,指当绝缘表面附有污秽时发生的沿面放电现象。在很多情况下,是由于污秽中的可溶性电解质在潮湿状态下有良好的导电性能而导致的闪络。

绝缘子的污闪电压与绝缘子结构,绝缘子上污秽的性质、数量,以及气象条件等有关。在不利的条件下,污闪电压可接近于电力系统的相对地电压。为防止污闪,要根据线路通过地区的污秽情况(见输电线路污秽分级),按照规定的爬电比距来选择绝缘子,或采用专门的防污型绝缘子。在特重污秽区,则应加强绝缘子的清洗维护工作或采用特殊涂层。

(王秉钧)

wunei peidian zhuangzhi

**屋内配电装置** (indoor switchgear arrangement)

电气设备布置于屋内的配电装置。它占地面积较小,运行检修条件较好,能较有效地防止外绝缘的污闪,广泛应用于35kV及以下的配电装置中,在城市地区、污秽地区以及场地狭窄地区的110 kV或220 kV变电所,也可采用屋内配电装置。

**布置和安装方式** 屋内配电装置中电气设备的安装方式有装配式和成套式两种。装配式是将电气设备分别固定在间隔内,这种方式对安装调试不太方便,施工工期较长,体积也较大,它仅用于110~220 kV屋内配电装置和出线带电抗器的6~10 kV屋内配电装置中。成套式是在制造厂内按照规定的接线要求,将各电气设备组装在金属柜内,从而使配电装置间隔标准化和小型化,它具有运输安装方便、施工工期短和体积小等优点,大量用于出线回路不带电抗器的6~35 kV屋内配电装置中。

屋内配电装置可以为单层、二层或三层的建筑。为

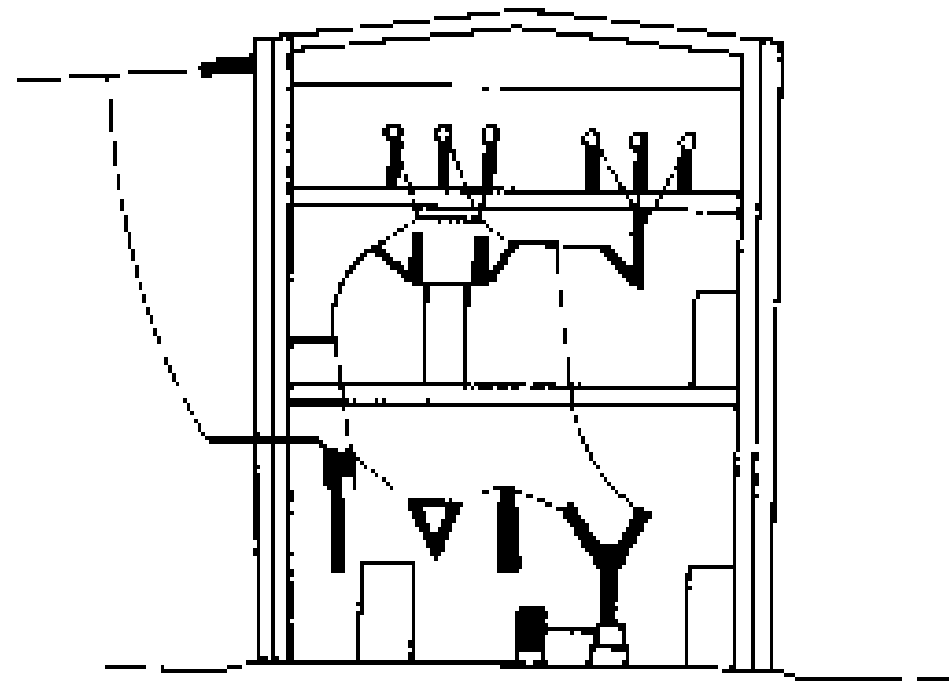
了保证安全运行,中国的有关标准规定:长度大于7 m 的屋内配电装置室需设置两个出口,大于60 m 时则应再增加一个出口,出口处要装有向外开启的防火门。配电装置的耐火等级不得低于二级,并装设事故通风装置,允许装设不可开启的采光窗。

110、220 kV 屋内配电装置 110 kV 及以上的电气设备体积和最小安全净距均较大,故需建造庞大的屋内配电装置楼,建筑材料消耗多,建筑费用较高。中国在1970年以后,尽量选用少油断路器或六氟化硫断路器、V型隔离开关或双柱式隔离开关和套管式电流互感器等,还在布置上压缩母线相间距离、间隔宽度、配电装置跨度和层高等,以提高屋内配电装置的技术合理性和经济性,使得110 kV 屋内配电装置应用渐多,220 kV 屋内配电装置在沿海地区也开始应用。

110、220 kV 屋内配电装置主要用于污秽地区,包括粉尘、盐雾和化学气体污染严重的地区,以减少配电装置清扫工作量和污闪事故,减少停电损失和提高供电可靠性。在日本,盐雾污染特别严重的海边的500 kV 变电所甚至也采用屋内配电装置。此外,土地少、地价昂贵的城市以及场地狭窄的山区中也有采用。

110、220 kV

屋内配电装置多数采用两层布置,底层布置断路器、电流互感器和出线隔离开关等,上层布置母线和母线隔离开关,并设置巡视



操作走道和起吊设施,以便于安装检修。这种配电装置一般采用装配式(见图1),有砖混凝土结构和框架结构两种。配电装置内设有良好的通风和自然采光设施。其主要尺寸见表。

110、220kV 屋内配电装置的主要尺寸 (m)

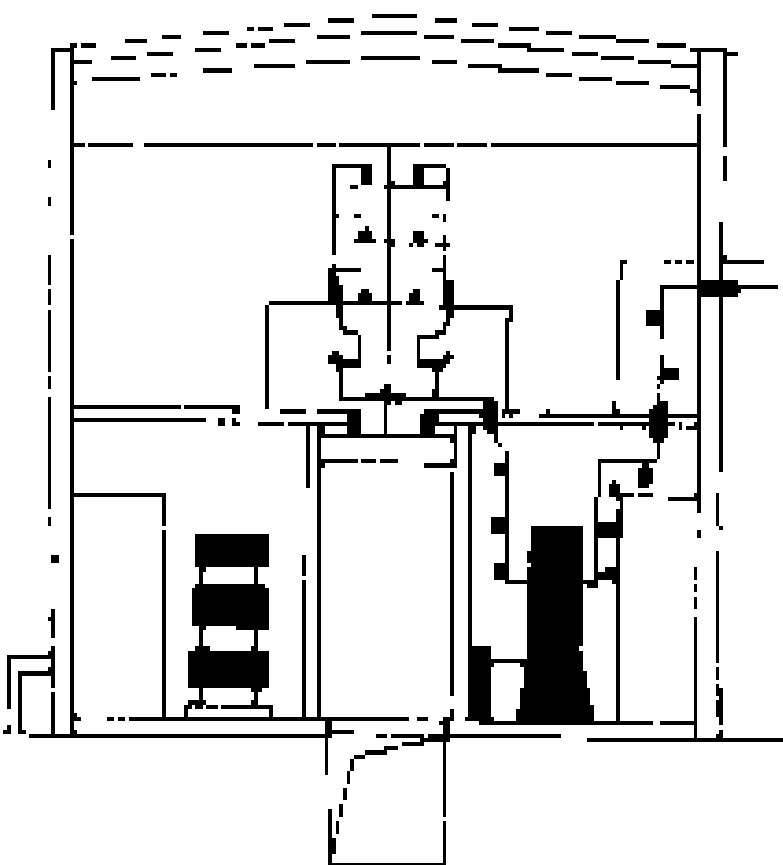
电压等级 (kV)	110	220
接线方式	双母线带旁路母线	双母线带旁路母线
相间距离	1.2~1.5	2.2~3.0
间隔宽度	6.0~8.5	12.0
配电装置跨度	11.5~13.4	26.6 (单列布置) 44.55 (双列布置)
配电装置高度	13.8~14.8	20.0~24.0

6~35 kV 屋内配电装置 6~10 kV 配电装置中电气设备的体积和空气最小安全净距均较小,所以一般都采用屋内配电装置。35 kV 配电装置屋外式与屋内式的技术经济指标较接近,所以多数也采用屋内配

电装置。

6~35 kV 屋内配电装置也有装配式和成套式两种。装配式6~10 kV 屋内配电装置有两层和三层两种布置方式。三层时采用双列三走廊布置,第三层为母线层,第二层为断路器层,底层则布置出线电抗器。三层布置方式由于土建结构复杂和巡视操作路线长等因素,已逐渐被两层式布置方式取代。两层布置方式的上层为母线层,单列双走廊布置,底层为断路器和出线电抗器层,双列三走廊布置。装配式的各个间隔互相用钢板、砖墙或混凝土墙隔开,防止电气事故向左右相邻间隔蔓延。6~10 kV 装配式间隔主要用于双母线出线带电抗器的接线方式(见图2)。35 kV 装配式间隔主要用于双母线或双母线带旁路母线的接线方式。

成套式6~35 kV 屋内配电装置都是单层布置,按接线要求选用各种型号的工厂制造的开关柜,它可以靠墙或离墙组装成单列或双列布置形式。成套开关柜都是钢结构,每个开关柜都用钢板封闭成独立



的小间,母线装设在开关柜的上部,柜内布置有继电器小室,面板上安装有仪表和操动机构。断路器可以固定在开关柜后壁上,称作固定式开关柜,也可以固定在小车上,称作手车式开关柜。固定式开关柜内配装有母线和出线隔离开关,还可装设旁路母线和旁路隔离开关,还可以构成双母线接线,并装设防止误操作的设施。手车式开关柜不需要装设隔离开关,在手车上配有隔离插头。同类手车可以互换,并可拉出手车检修断路器,以减少检修停电时间,但它只能用于单母线接线。

在6~10 kV 出线上带出线电抗器时,为了简化6~10 kV 屋内配电装置的结构,便于施工和运行管理,也可以采用装配与成套混合式的两层布置。在上层布置双母线成套开关柜,在底层则装配布置电抗器与断路器;或者在上层布置装配式双母线和隔离开关,在底层布置电抗器和成套开关柜。

参考书目

西北电力设计院编,发电厂变电所电气接线和布置,北京:水利电力出版社,1984

(戈东方)

wuwai peidian zhuangzhi

屋外配电装置 (switchyard) 将断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、阻波器、耦合电

容器和避雷器等电气设备布置在屋外的配电装置。设备露天布置，母线和设备之间的连接导线利用构架架设或支架支撑，是110 kV及以上配电装置常用的一种布置型式。

屋外配电装置占用的土地面积和空间由电气设备的外形尺寸、安装方式、导体型式和架设支撑方式、带电检修和维护搬运的安全距离，以及电气绝缘距离等因素决定。

布置型式 根据电气设备布置安装的高度不同，屋外配电装置有低型、中型、半高型和高型等几种布置型式。当设备为落地布置，周围需要设置防护围栏的为低型布置，也称低型屋外配电装置。设备安装在支架上或较高的基础上，设备周围不需要设置防护围栏的为中型布置（见中型屋外配电装置）。母线在设备上方的为半高型布置（见半高型屋外配电装置）。双母线接线时两组母线上下两层重叠布置，母线隔离开关在上层操作，并且可以上人巡视维护的为高型布置（见高型屋外配电装置）。

低型屋外配电装置因占地过大，已很少采用。中型屋外配电装置的占地面积也较大。1970年以后，中国逐步发展了半高型和高型屋外配电装置，在110 kV和220 kV屋外配电装置中得到较多的采用，它所占用的土地面积显著减少。各种型式屋外配电装置的比较和适用范围见表。

各种型式屋外配电装置的比较和适用范围

型 式	中 型	高 型	半 高 型
施 工 条 件	一般，但双层构架和悬臂梁的施工较复杂	主母线、旁路母线及其隔离开关需重叠布置，结构较复杂，施工工作量较大	一组母线及其隔离开关需高位布置，增加了施工工作量
运 行 条 件	巡视维护方便，抗震性能较好	巡视维护较不方便，抗震性能差	巡视维护尚方便，抗震性能稍差
检 修 条 件	导线上人检修和带电作业均较方便	较不便	一般
适 用 范 围	占地面积较大，在地震区或土地贫瘠地区采用较多	节约用地效果较显著，用于人多地少、需占用农田及位置狭窄地区，但不宜用于地震基本烈度为9度及以上的地震区	

为了减少屋外配电装置的占地面积，除了采用合适的布置型式外，选择合适的导体和电器型式，也会取得更显著的效果。采用硬管母线与采用软母线相比可

以缩小母线间距、缩小配电装置的纵向尺寸和降低构架高度，但对防污秽、防风、抗震和抗不均匀基础沉降等均需采取相应的措施。合理地选择隔离开关的结构型式，也可节约土地。母线隔离开关采用单柱垂直开启式隔离开关，可以直接布置在母线下方，减少了母线隔离开关的纵向长度。采用组合电器也将减少设备之间的距离和占地面积。

最小安全净距 在屋外配电装置各种间隔距离中，最基本的是空气中的最小安全净距A值，它表明带电部分至接地部分或相间的最小安全净距。保持这一距离时，无论在正常或过电压的情况下，都不会发生空气绝缘的电击穿。由于相间闪络的后果比相对地闪络更严重，故相对相的A值比相对地的A值大些，中国要求大10%，日本要求大25%，美国要求大15%~20%，英国亦要求大10%。

除A值外，还有B、C、D值，它们是在A值的基础上，加上运行维护、搬运和检修工具活动范围及施工误差等尺寸而确定的。B值是指带电部分至栅栏、遮栏以及可移动设备在移动中至无遮栏带电裸导体的净距。C值是保证人举手时，手与带电裸导体之间净距不小于相对地的A值。D值是保证配电装置检修时，人和带电裸导体之间净距不小于相对地的A值。

构架 屋外配电装置的构架包括梁和柱两部分，通常有钢和钢筋混凝土两种结构型式。采用现场预制钢筋混凝土结构，施工质量不稳定，外观也较粗糙笨重，材料消耗较多，施工时间也较长，已很少采用。梁和柱均为桁架式钢结构的构架，需要涂漆或镀锌以防锈，维护工作量较大，钢材消耗多，因此使用也受到限制。中国使用最多的是环形钢筋混凝土电杆柱和钢梁的构架。环形电杆由工厂预制，现场装配，直径为300~400 mm，有预应力和非应力式两种。由于它容易实现工厂化，缩短安装工期，节约原材料，不需防腐防锈处理，较轻巧美观，所以使用较广。对高而受力大的构架，通常采用两根或三根环形电杆组成的空腹桁架结构，以增加刚度和减少挠度。500 kV屋外配电装置中的构架，除采用钢桁架结构外，还有一种在钢管内充以素混凝土做为支柱和用钢板箱形结构作为横梁的钢结构构架，已在工程中得到应用。国际上多数采用钢桁架结构的构架，它具有施工方便、轻巧和美观的优点。

参见彩图插页第9页30图。

（弋东方）

wuren zhiban bianliansuo

无人值班变电所（non-attended substation） 无值班人员进行经常监视与操作的变电所。通常为位于城市内或近郊交通方便地点的35 kV



变电所及 110 kV 终端变电所。

无人值班变电所的电气主接线较简单，一般为线路-变压器组、桥形接线或单母线接线，而且电气设备操作较少，自动化水平较高，短时停电时对用户影响不大。这种变电所在电气设备选择、布置、保护和自动装置的设置等方面与有人值班的变电所基本相同，但减小了控制室的面积，取消了值班室和职工宿舍等附属设施。控制室内配电屏的布置不需要考虑监盘视角和高照明照度，控制室也可以供来变电所巡视和维修人员休息之用。

变电所实现无人值班方式的主要措施有：①加装必要的自动化设备，以便能迅速自动消除不正常运行状态，例如在线路上装设自动重合闸装置、在变压器上装设风机自动投入装置、根据电力网需要装设自动减负荷装置等。②装设必要的远动设备和报警装置，使调度所能及时了解变电所的运行情况，也可以将报警信号传送到用户的值班室后再转送给调度所，或通过自动电话将信号传送给调度所，由调度所根据情况派入到现场进行处理。③取消铅酸蓄电池，以减少其日常巡视维护工作，变电所二次回路电源采用复式整流电源或电容储能电源，但这时需由两个独立的 380 V 交流电源作为整流电源，除由自用电变压器引接一个电源外，可以在变电所电源进线上的断路器之前再装设一台自用电变压器。如果变电所附近有低压配电网时，也可以由此低压配电网中引接一个电源。

(徐锡镛)

Wuhan Gaoya Yanjiusuo gaoya shiyanshi  
**武汉高压研究所高压实验室** (high voltage laboratory of Wuhan High Voltage Research Institute) 位于中国武汉市关山，始建于 1975

年。该实验室设有高压试验大厅及户外试验场。

高压试验大厅的尺寸为 50 m×40 m×30 m(高)，可满足交流 750 kV 等级、直流±800 kV 等级的电气设备绝缘试验及高压测量设备校验的需要。大厅采用了双层钢结构，全部地面用双层钢板拉网作为接地回线。由于六面屏蔽，形成了法拉第笼，电磁屏蔽效果甚佳，达到 78 dB。

整个大厅的空调指标为：温度 20±5℃，相对湿度 65%±5%，垂直方向 2~20 m 范围内温差小于 0.5℃，气流速度不大于 20 cm/s。

大厅内主要设备有：一台 1400 kV 的无电晕串级工频试验变压器；4000 kV、200 kJ 的冲击电压发生器及 3600 kV 的多级截波装置各一台；一台 2000 kV、25 mA 的直流高压发生器。主要设备下装有气垫，可借助气垫移动。

户外试验场尺寸为 120 m×240 m，场内装有：一套 2250 kV、2 A 的串级工频试验变压器，一台 5.4 MV、480 kJ 的冲击电压发生器以及一段 500 kV 的试验线段。

(郑健超)

wushan

**雾闪** (flashover in fog) 绝缘子等外绝缘在雾中发生的沿面放电现象。清洁绝缘子的雾闪电压稍低于其湿放电电压，闪络过程亦与湿闪类似。由于运行中的绝缘子表面上不可避免地沉积有污秽，故大部分雾闪实质上是污闪。污秽绝缘子的雾中闪络电压比在其他湿闪条件下的闪络电压低。为防止雾闪，在雾季到来之前，应对绝缘子进行清扫。

(王秉钧)



Xi'an Gaoya Dianqi Yanjiusuo dagonglu shiyanzhan  
**西安高压电器研究所大功率实验站** (high power laboratory of Xi'an High - Voltage Apparatus Research Institute) 中国最大的大功率实验站, 位于西安市区西部, 1964 年投入使用, 1973 年扩建一台冲击同步发电机。该实验站现可完成 500 kV 及以下各电压等级的断路器、隔离开关、组合电器、封闭式组合电器、金属铠装电器、负荷开关、熔断器等产品的型式试验, 是中国的国家高压电器质量监督检验测试中心。

站内主要设备有: 冲击同步发电机 3 台, 其中 2 台为 TH-100 型, 每台 12 kV 下的标称短路功率为 2500 MV·A, 并联运行最大直接试验功率可达 2300 MV·A, 另有 1 台为 TH-25 型, 12 kV, 短路功率为 500 MV·A, 用于动热稳定性试验; 升压变压器 3 台, 均为 OMTI-20000/220 型, 电压为 12/240  $\sqrt{3}$  kV, 短路阻抗为 12.5%; 降压变压器 3 台, 均为 OMI-10000/10 型, 电压为 10 kV/125、250、500 V, 短路阻抗为 7.3%, 用于动热稳定性试验; 短路变压器 3 台, 均为 OMTI-50000/220 型, 电压为 12/(2×35) kV, 短路阻抗为 3.6%; 非标准短路变压器 3 台, 单台容量为 50000 kV·A, 短路阻抗为 2.6%。大、小振荡回路分别设有: 主电容器组, 包括 384 台总容量为 4.38 MJ 的 MY-30-19 型脉冲电容器和 144 台总容量为 2.47 MJ 的电容器; 调节电抗器, 包括 32 台 PYB-20-10.6 型 (20 kA、10.6 mH)、2 台 PYB-9-45 型 (9 kA、45 mH) 和 2 台 PYB-2.2-375 型 (2.2 kA、375 mH); 调频电容器 32 台, MY-150-0.65 型 (150 kV、0.65  $\mu$ F); 近区故障模拟回路 1 组。小振荡回路的布置可模拟空载长线链型回路。

振荡回路与冲击发电机配合, 可进行合成试验。单分时可完成 500 kV SF<sub>6</sub> 断路器 1/2 极 50 kA 的试验, 重合闸试验能力为 40 kA。三相短路直接试验的最高参数为 12 kV、100 kA。

自 1988 年起开始扩建三期工程, 拟新增一套 30

万 kW 冲击同步发电机和相应配套设备, 可进行 500 kV、63 kA SF<sub>6</sub> 断路器整极试验, 容量 50~60 MV·A 变压器的突发短路试验以及  $\pm 500$  kV 高压换流阀组件功能试验。

(顾竟鸿)

xiaoxinglei

**下行雷** (downward lightning) 见雷云放电过程。

Xiamen Jimei Gaoqi haidi dianlan gangcheng

**厦门集美—高崎海底电缆工程** (Xiamen Jimei - Gaoqi submarine cable project) 跨越集美至高崎之间海峡的电缆工程, 是福建省大陆向厦门岛送电的 220 kV 输配电工程的一部分。该工程从集美镇用 4.4 km 长的 220 kV 单芯自容式充油海底电缆跨越海峡, 在厦门岛上的高崎登陆后, 与 2.8 km 长的陆上 220 kV 充油电缆用塞止接头对接, 穿过厦门机场, 在厦门市郊区的斗门再连接 10 km 架空线路至新建的半兰山变电所, 与岛内电网相连。

海底电缆由法国里昂电缆厂的加莱工厂生产, 三相电缆分成二根交货。一根长 4.4 km 作一相用, 另一根长度为 8.7 km 在现场分割成二相。每相电缆没有接头。为了避免电缆在转驳过船及卸至施工敷设船的过程中的多次缠绕及扭转, 采用筒装运输。小筒外径 13.5 m, 高 2.0 m, 装电缆 4.4 km, 毛重 225 t; 另一筒外径 13.5 m, 高 3.3 m, 装电缆 8.7 km, 毛重为 450 t。海底电缆由滚装船运至厦门港, 用船上的吊杆卸至敷设船上。

海底电缆的结构为型线铜导体 630 mm<sup>2</sup>、油道内径 13.5 mm、纸绝缘厚度 20.5 mm、铅合金护套 3.8 mm、两层加强带为 0.19 mm 不锈钢带、高密度聚乙烯防蚀层 4.2 mm、41 根直径为 7.62 mm 的镀锌钢丝铠装和浸渍聚丙烯外护层。总外径为 121.2 mm, 空气中重量为 44 kg/m。交货时海底电缆及二个电缆筒总重 675 t。

厦门岛自 1954 年与大陆间修建海堤后, 潮流被阻。海堤上下游海床淤积, 三分之二海床成为浅滩, 海岸二侧向外 1.4 km 是海涂。只有中间三分之一是海域, 在涨潮时水深 10 m, 且流速不大。

工程选用吃水浅的 400 t 方驳二艘, 用铰支连接法拼绑后, 作为敷设船。因舱面操作场地不够大, 将二个电缆筒叠起来放在二艘方驳的中间。船上组装了敷设电缆的机具, 包括 17 m 高的退扭架、放线滑轮槽、履带牵引机、入水槽、卷扬机、高压水泵、空压机和发电机等。

采用牵引-顶推法敷设海底电缆。由集美向高崎敷设，三天敷设一根。第一天敷设船离集美岸 700 m 处锚泊，在涨潮时，由岸边卷扬机牵引拉出船上电缆，用轮胎悬浮送至岸边。第二天敷设深水段，船在高崎岸边锚泊。第三天电缆登高崎岸。参见彩图插页第 32 页 103 图。

海底电缆敷设后全线深埋。滩地及海涂用人工挖沟，埋深 1.2m。深水段用有压缩空气及高压水枪组成的埋设机进行深埋。

该工程由福建省电力勘察设计院设计，上海电缆输供电公司、上海基础公司和福建电力建设公司施工。工程于 1988 年 5 月开工，1989 年 1 月竣工，同年 6 月投入运行。

(李给芬)

xiandao

先导 (leader) 见雷云放电过程。

xianliu diankangqi

限流电抗器 (current-limiting reactor)

与输电线路串联用以限制电力系统短路电流的电抗器，又称串联电抗器。通常安装在线路出线段或母线段之间 (见图 1)。当线路或母线发生故障时，限流电抗器能使后接设备的短路电流不超过容许值，并使母线电压保持在额定电压的 60%~70% 之间。带有中心抽头和两个对称臂的电抗器称为分裂电抗器，使用时中

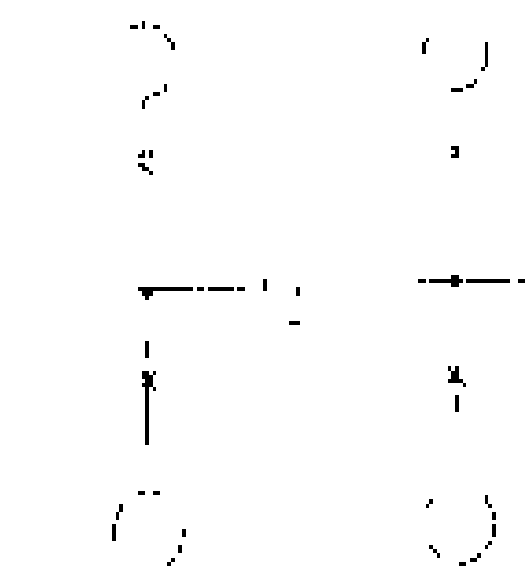


图 1 限流电抗器接线图

心抽头接电源，两臂接负荷 (见图 2)。在多台变压器和多回线路的变电所，限流电抗器还可用来进行阻抗匹配，使变电所达到最佳运行状态。

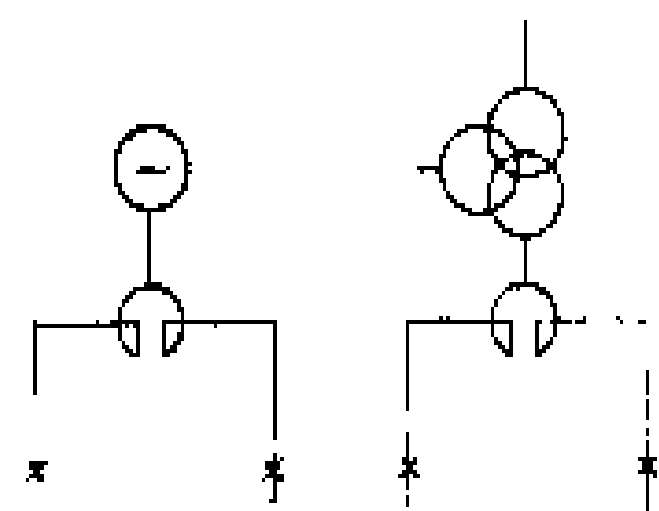


图 2 分裂电抗器接线图

限流电抗器在额定电流下的电压降，通常为额定电压的 3%~10%。分裂电抗器两个臂的电抗值和载流量相同，正常工作时两臂的电流方向相反，大部分磁通相互抵消，从而其电压降减小，当一臂发生故障时，磁通不能抵消，电抗值增大，从而起到限流作用。

额定电压在 35 kV 以下、额定电流为 200~3000 A 的户内式限流电抗器，通常为空芯混凝土柱式结构。额定电压在 35 kV 及以上的限流电抗器，一般为空芯油浸户外式结构，油箱内壁加装磁分路或磁屏蔽。近年

来又研制成一种新型玻璃纤维结构的空芯式电抗器，其造型简单轻巧，适应于户内和户外。

限流电抗器通常都做成单相式，组成三相时有三相垂直重叠、两相垂直重叠一相并列、三相并列等三种排列方式 (见图 3)。排列方式不同，其绕组的绕制方向和匝数要求也不同。由于限流电抗器的磁通在空气中形成回路，所以安装时与屋顶、四壁和地面需要保持一定的距离。

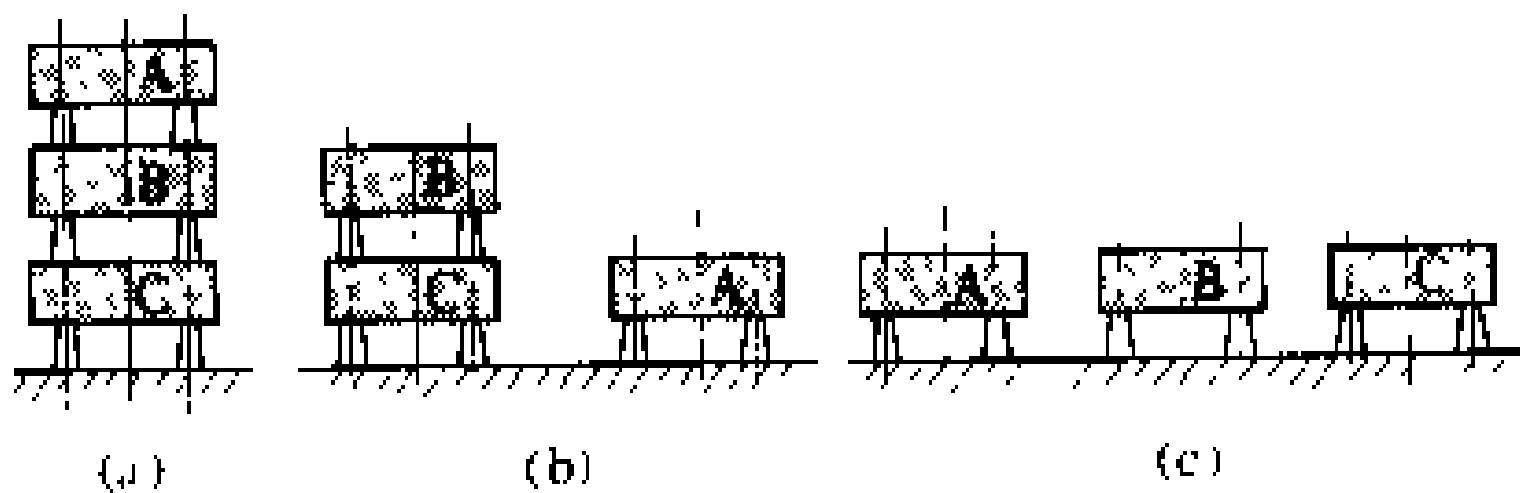


图 3 电抗器三相排列方式

(a) 三相垂直重叠；(b) 两相垂直重叠，一相并列；

(c) 三相并列

(潘文宗)

xianliu diankangqi xuanze

限流电抗器选择 (selection of current limiting reactor) 限流电抗器主要是用来限制短路电流，使变电所能选用轻型和价廉的断路器。当配电线路发生短路时，限流电抗器还可以维持变电所的母线电压在一定的水平。限流电抗器应用在实际工程中主要有母线分段电抗器、变压器回路电抗器和线路电抗器三种装设方式。

母线分段电抗器 装设在母线分段断路器处。当线路上或一段母线上发生短路故障时，它能限制另一段母线上电源所供给的短路电流，如满足要求，将能省去在每回线路上装设电抗器，以节省工程投资。但它限制短路电流的效果较小。

变压器回路电抗器 当变压器容量较大、短路电流超过断路器的开断能力时，在变压器回路内装设普通电抗器或分裂电抗器，以限制变压器供给的短路电流。当装设普通电抗器时，在正常运行工况下会产生较大的电压损失。装设分裂电抗器可以减少电压损失，它有两个分支回路，每一个分支回路的感抗包括有自感和互感两部分，正常运行时，分裂电抗器两个分支回路内电流方向相反，互感为负，故其感应电动势使电压降减少。当线路上发生短路故障时，短路电流只流过分裂电抗器的一个分支，另一个分支仍流过负荷电流，这时反方向电流的作用可略而不计。如分裂电抗器仍流过负荷电流的分支后还接有其他电源，则分裂电抗器中两个分支回路内电流方向相同，互感为正，增大了电抗，使短路电流得到限制。

**线路电抗器** 当其他限制短路电流措施不能满足要求时,或为了维持母线电压水平,才采用在线路上装设普通电抗器或分裂电抗器的措施。这种措施装设电抗器的数量最多,使配电装置结构复杂、运行维护不便。通常尽量避免在线路上装设电抗器。

(叶景星)

xianlu daoxian shiyan

**线路导线试验** (tests of transmission line conductors) 为研究和检测架空线路导线力学和电气性能进行的试验。线路导线多为多股铜(铝)线或再加多股钢芯线绞制而成,在受力、受热后的应力状态和电气性能较为复杂,需采用测试手段来确定其各项性能指标,从而为线路设计、施工和运行部门提供有关参数,并对导线质量进行检验。

导线力学性能测试项目主要有:拉断力及弹性系数测试、耐振试验、蠕变试验和线膨胀系数测量等。导线电气性能测试项目主要有:直流电阻测量、交流电阻测量、允许载流量试验和电晕试验等。

**拉断力及弹性系数测试** 导线拉断力指导线承受拉力直至破坏时的拉力值。导线弹性系数指在导线弹性范围内导线应力与应变的比值。它们都是计算导线受力状态的重要参数。

**试验装置** 通常采用特制的卧式拉力机,其特点是测距长,拉力大。试验中还采用液压加荷系统,配有高精度的拉力传感器、位移传感器及x-y绘图仪,测量导线拉力、伸长量和绘制应力应变图。

**试验方法** 试件两端采用压接管或用低熔点合金浇铸锚头。两钳口间试件有效长度应符合标准规定。

拉断试验时拉伸速度不大于100 mm/min,取试件被拉伸破坏时的表计读数作为试件的拉断力。测得的拉断力不低于导线计算拉断力的95%为合格。弹性系数试验时,加载范围通常为计算拉断力的15%~50%,一般进行5个负荷循环(加载后再卸载称为一个负荷循环)的试验。以第一次加载时所得的应力-应变曲线的直线部分斜率为导线起始弹性系数,以第五次加载时所得应力-应变曲线的直线部分斜率为导线最终弹性系数。

**导线耐振试验** 微风振动时导线在线夹出口处承受交变应力的反复作用,致使该处线材因累积振动所造成的疲劳而断裂。通过耐振试验,判定导线在规定振动强度条件下的耐振能力,同时获取张拉导线承受交变应力幅值与耐振次数(线股开始出现断裂时的振动次数)间的关系,为估算导线使用寿命提供依据。

**试验装置** 由试验线段、加荷装置、振动台及控制测量系统组成。试验线段的长度原则上应满足导线振

动稳定的要求。加荷装置有油压加荷、杠杆式砝码加荷及机械秤式加荷几种类型。振动台分电磁式、液压式和机械式三类,配有控制器调整振幅和频率。在导线振动的波腹处安装加速度传感器以测量波腹振幅,在悬垂线夹出口导线正上方贴有应变片以测量该处的动态弯曲应变值。

**试验方法** 试验时对导线施加25%的计算拉断力的张力或平均运行张力值,振动频率取20~40 Hz或更宽的范围。试验方法分两类,第一类以线夹出口处导线上的动弯应力(应变)幅值来表示振动强度,第二类用导线振动角(由波腹振幅值换算)表示振动强度。通过试验测量不同振动强度下的导线耐振次数。国际上较多采用第一类方法。中国目前采用第二类方法,取导线振动角为30',导线经 $3 \times 10^7$ 次振动后其内外层线股不发生疲劳断股为合格。

**导线蠕变试验** 导线蠕变是金属材料承受拉伸应力,随着时间的增加,导线内部晶体结构发生变化而引起的永久性伸长。它与张力、时间、温度、材料及线型等诸多因素有关。通过蠕变试验确定导线蠕变伸长特性,可为线路设计、施工提供对蠕变影响的处理依据。

**试验装置** 主要是蠕变试验机,分立式和卧式两类。立式蠕变试验机需有高大的受力构架,如框架式和圆筒式构架,导线需垂直布置。卧式蠕变机作水平布置,空间高度远小于立式的。蠕变试验装置还有下列各组成部分:①加载系统。一种是快速无冲击加载,加载过程在30 s内完成,如杠杆式砝码加载、机械秤式加载。另一种是均匀缓慢加载,加载过程在5 min±10 s内完成,如液压加载系统。②测长装置。使用位移传感器测量蠕变伸长量,应测出2 mm/km以上的应变。③恒温装置。实验室以绝热材料隔热保温,由空调装置保持室内恒温环境,温度变化不超过±2.5℃。在进行高温蠕变试验时,将导线通以低压大电流或采用其他方式加热导线,用热电偶或铂式温度片测量导线温度。

**试验方法** 试验方法有两种,一种是将导线张力加至试验张力值的75%开始读数,另一种是加至试验张力值开始读数。加载开始阶段导线蠕变率大,读数的时间间隔要短些(以分钟计),以后蠕变率变小,读数时间间隔可长些(以小时计)。试验至少要持续2000 h。室温变化大于1℃时,每12 h记录一次温度。

**数据处理** 根据测试数据在双对数坐标纸上绘制整条应变与时间的关系曲线,再根据曲线拟合出导线蠕变的表达式。

**导线线膨胀系数测量** 导线受热后温度增高1℃,导线增加的长度与原有长度的比称为导线线膨胀系数。一般用 $\alpha$ 表示,单位为1/℃,它是用来计算



导线温度变化时其受力状态变化的重要参数。

线膨胀系数是应用热膨胀试验机测量的,该机主要由加载装置、测伸长机构、测温机构及加热设施四部分组成。测试时一般将 4.5m 长的试件垂直置于密封筒中,在其下端加一定的荷重。测伸长的测定标距  $L_0$  为 1 m,标距两端各装有电阻温度计,测伸长机构同时也垂直置于密封筒中。由加热设施对密封筒通入热风,由测温机构将实测电阻换算为导线温度,同时测长机构测出加温后的伸长量  $\Delta L$ 。每根试件按下述步骤反复试验并测量三次。每次试验均将试件由室温逐步加温至 90℃,其间每升高 10℃测伸长量一次。消除测长机构铈钢引伸杆的线膨胀影响后,试件的线膨胀系数  $\alpha$  由下式确定

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta t} + 1 \times 10^{-6}$$

式中  $\Delta t$  为试件加热前后的温差,℃;  $1 \times 10^{-6}$  为铈钢的热膨胀系数。

**直流电阻测量** 采用双臂电桥或直流电位差计,在 15~25℃ 环境温度下对导线试件通以适当的直流电流,测量其直流电阻值。

**交流电阻测量** 采用高精度交流电位差计和电子平衡指示器,对导线试件通以适当的交流电流,测量其交流电阻值。

**允许载流量试验** 架空导线在一定的气象条件和允许温升情况下的载流量称为允许载流量。允许载流量的大小与导线电阻、温升、风速、日照和表面状态等因素有关。允许载流量试验在模拟载流条件下的试验室中与交流电阻测量同时进行。

(徐乃管)

xianlu fanglei

**线路防雷** (lightning protection of transmission line) 为防止雷害以保证线路正常运行的安全措施。

输电线路长度大,暴露在旷野或高山,受雷击的机会多,事故后恢复供电难度大,时间长,且其防雷设施常要沿整条线路敷设,造价较高。因而线路防雷措施的可靠性和经济性一直是电力建设和运行的重要课题。

**雷击线路的各种情况** 有直击、反击、绕击和感应雷击等几种情况。

**直击** 雷直接击于无避雷线输电线路的导线,使导线对杆塔闪络。一般线路每百公里每 40 雷暴日(相当于中国平均每年的雷暴日数)雷击总数为

$$N = 0.015 \times 40 \times h_c = 0.6 h_c$$

式中  $h_c$  为上导线的平均高度, m。在非有效接地系统中,无避雷线线路(铁塔或钢筋混凝土杆)的雷击跳闸

率为

$$n = 0.6 h_c \eta P, \text{次}/(\text{百公里} \cdot 40 \text{ 雷暴日})$$

式中  $P$  为超过线路耐雷水平的概率;  $\eta$  为建弧率。建弧率是线路经空气间隙或沿绝缘子串发生冲击闪络后,转变为稳定的工频电弧的概率。建弧率  $\eta$  可近似地表示为  $\eta = E/72$ ,  $E$  为弧道的平均电场强度,且当  $E \leq 6$  kV/m 时,建弧率接近于 0。

在中性点非直接接地的系统中,无避雷线线路的耐雷水平

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k) \left( R_i + \frac{L_T}{2.6} + \frac{h_c}{2.6} \right)}, \text{kA}$$

式中  $k$  为在冲击电晕时上、中导线间的耦合系数;  $h_c$  为中导线平均高度, m。

在有效接地的系统中,雷直击杆塔顶部时,无避雷线线路的耐雷水平可由下式估算

$$I = \frac{U_{50\%}}{R_i + \frac{L_T}{2.6} + \frac{h_c}{2.6}}, \text{kA}$$

式中  $U_{50\%}$  为线路绝缘子串 50% 正极性雷电冲击放电电压, kV;  $R_i$  为杆塔冲击接地电阻,  $\Omega$ ;  $L_T$  为杆塔电感,  $\mu\text{H}$ ;  $h_c$  为导线的平均高度, m。而当雷直击于导线时线路的耐雷水平可由下式估算

$$I = \frac{4U_{50\%}}{Z}, \text{kA}$$

式中  $Z$  为导线的波阻抗,  $\Omega$ 。

**反击** 雷击于有避雷线线路的杆塔或避雷线,由杆塔对导线闪络(见反击)。雷击塔顶时,作用在绝缘子串上的电压

$$U = I_1 \left( \beta R_i + \frac{\beta L_T}{2.6} + \frac{h_c}{2.6} \right) (1-k)$$

对中性点直接接地的系统,雷击杆塔时线路的耐雷水平

$$I_1 = \frac{U_{50\%}}{(1-k) \left[ \beta \left( R_i + \frac{L_T}{2.6} \right) + \frac{h_c}{2.6} \right]}, \text{kA}$$

上两式中  $\beta$  为分流系数,一般为 0.9 左右;  $h_c$  为下导线平均高度, m; 其它各值及单位与前几式中的相同。

雷击避雷线时,过电压沿避雷线到杆塔,需计入由雷击点分流和避雷线波阻抗的影响。

雷击杆塔次数与雷击线路总次数之比叫做击杆率,用  $g$  表示。 $g$  值与避雷线的根数和地形有关,其值在 1/6 到 1/3 之间。

**绕击** 雷电绕过避雷线直击于线路导线。雷绕击导线的次数与雷击线路总次数之比称为绕击率,用  $P_r$  表示。平原地区线路的绕击率为

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h}}{86} - 3.9$$

山区线路的绕击率为

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h}}{86} - 3.35$$

上两式中  $h$  为杆塔高度, m;  $\alpha$  为避雷线的保护角, 是避雷线与所保护导线间连线和避雷线对地垂线间的夹角, 度。

雷绕击导线的耐雷水平与雷直击导线时的相同。

综合反击和绕击, 有避雷线线路的雷击跳闸率为

$$n = 0.6 h_{\alpha} \eta [g P_{I_1} + (1 - g) P_{I_2} + P_{\alpha} P_{I_2}], \text{次} / (\text{百千米} \cdot 40 \text{ 雷暴日})$$

式中  $h_{\alpha}$  为避雷线平均高度, m;  $P_{I_1}$ 、 $P_{I_2}$  分别为雷击杆塔和避雷线时线路的闪络概率;  $P_{I_2}$  为雷绕击导线时线路的闪络概率。(见雷电参数)

**感应雷击** 见感应雷过电压。当  $S > 65$  m 时, 感应雷过电压的幅值近似为

$$U_i = 25 \times \frac{I h_c}{S}, \text{ kV}$$

式中  $I$  为雷电流幅值, kA;  $h_c$  为导线悬挂的平均高度, m;  $S$  为雷击点到线路的距离, m。对有避雷线的线路, 塔头绝缘上的感应雷过电压为

$$U_i \approx U_{i1}(1 - k), \text{ kV}$$

式中  $k$  为导线与避雷线间的耦合系数。当雷击于杆塔或避雷线时, 对无避雷线、一般高度的线路, 塔头绝缘上的感应雷过电压为

$$U_T = ah, \text{ kV}$$

在有避雷线时, 为

$$U_T = ah(1 - k), \text{ kV}$$

式中  $a$  为系数, 其值等于以 kA/ $\mu$ s 为单位的雷电流平均陡度。

实测证明, 感应雷过电压的幅值可达 300~400 kV, 会在 35 kV 及以下的线路上引起一定的闪络事故, 但一般不会引起 63 kV 及以上的线路闪络。

**线路防雷的主要措施** 主要有防直击、防反击、防建弧措施, 还常常配合自动重合闸, 使线路及时恢复正常。

**防直击** 雷直击于导线时, 线路的耐雷水平很低。为防直击雷, 通常采用沿线装设避雷线的办法。为降低绕击率, 要在经济合理的条件下尽量减小保护角, 某些超高压线路, 甚至要采用负保护角。中国在雷电活动比较强烈的地区, 63 kV 及以上电压的架空输电线路都装设避雷线。在雷电活动少的地区, 有的 220 kV 线路甚至不装设避雷线。在富产木材的地区, 使用木杆和木横担, 可有效地增强线路的冲击绝缘水平。对铁塔和混凝土杆的高压线路, 用增加几片绝缘子的办法, 并不能

明显提高雷直击线路的耐雷水平。

**防反击** 装有避雷线的线路, 反击是主要雷害事故原因。降低杆塔的冲击接地阻抗, 是提高这种线路耐雷水平最有效的措施。在高土壤电阻率地区, 降低接地电阻有困难或不经济时, 可设法增大耦合系数(见耦合地线)或适当增加绝缘子片数。

**防建弧** 中性点非直接接地的系统中, 装设消弧线圈, 在一相导线闪络后常能自动灭弧, 可有效地降低线路的跳闸率。用增加绝缘子串长度来降低建弧率, 通常是不经济的。

**自动重合闸** 雷击闪络一般不构成永久性接地故障, 自动重合闸常能使线路及时恢复供电, 且有造价低、维护方便等优点, 是一种有效的防雷措施。高压线路的重合闸成功率一般达 0.75~0.95, 35 kV 及以下电压的线路一般为 0.50~0.80。设计时 110 kV 及以上线路可用 0.75, 35~63 kV 线路可按 0.5 估算。超高压线路使用单相自动重合闸时, 要设法缩短电弧延续时间, 适当整定重合时间, 以提高重合闸的成功率。

**易击线段防雷** 一般易形成热雷云的湿热盆地, 山区风口和顺风峡谷, 地质断层, 岩石土壤交界处土壤电阻率  $\rho$  突变的低电阻率侧, 地下有导电矿藏和水位高的地区以及  $\rho$  变化不大地区的突出山顶和向阳坡等, 常构成易击区。选择线路路径时应调查清楚并避开易击区。对已建的易击线段, 要根据雷害事故分析, 有针对性的改进线路防雷性能, 甚至要将该段线路移开。

**高杆塔防雷** 线路大跨越档的杆塔, 常高达 100~200 m, 甚至更高。由于塔很高, 造成: 雷击概率急剧增加; 雷击塔顶后负反射波返回塔顶的时间长, 塔头部分过电压很高; 绕击率增加; 感应雷过电压分量高; 事故后不易维修。因而对高杆塔要求加强防雷措施。中国规程规定, 对高于 40 m 的杆塔要按高杆塔采取相应的加强防雷措施。

降低杆塔冲击接地电阻, 可部分补偿高杆塔在防雷方面的不利条件。高杆塔的工频接地电阻不应超过一般杆塔值的 50%, 最大不宜超过 20  $\Omega$ 。高杆塔的绝缘子片数要适当增加, 对 220 kV 大跨越的高塔, 中国采用 15~27 片的绝缘子串, 国际上一般用 18~20 片并在绝缘子串上装招弧环。高杆塔线路的避雷线的保护角不超过 20°, 但国际上 220 kV 的大跨越线段也有不用避雷线的。

根据雷击大跨越档距中央避雷线时防止对导线反击或反击后不建立稳定工频电弧的条件, 要求避雷线与导线间的距离  $S$  符合下面的条件, 即

$$S \geq 0.1I, \text{ m}$$

或

$$S \geq 0.1U_p, \text{ m}$$

式中  $I$  为雷击档距中央避雷线时的耐雷水平,  $\text{kA}$ , 一般取  $I=U/90$ ;  $U$  为雷击点的电压最大值,  $\text{kV}$ ;  $U_n$  为线路标称电压,  $\text{kV}$ 。

**同杆线路防雷** 雷击有两回(或多回)线路同杆架设的杆塔时,绝缘水平低的线路将首先闪络,保护了绝缘水平高的线路。这种用线路的不同绝缘水平来提高防雷性能的方法称不平衡绝缘法。当同杆线路的电压等级相同时,可人为地加强其中一回线路的绝缘水平。不平衡绝缘法在日本和苏联用得较多。

(王 遵)

xianlu ganta jichu shiyan

**线路杆塔基础试验** (tower foundation tests of transmission line) 确定单独一个基础或整塔塔基的承载能力、测定基础的相应位移及地基土的应力的试验。目的是验证设计理论、施工方法等是否合理。

基础试验一般分工程鉴定试验和科研性试验两种。①工程鉴定试验:用来检验杆塔基础的承载能力、位移和基础本体强度是否满足工程使用要求,一般是在施工现场作真型试验。试验时不埋设测量元件,试验数量较少,但要与实际线路地质情况相结合,选择有代表性的基础类型、地基和实际采用的施工方法。②科研性试验:为探讨新的基础类型、新的施工方法、新的计算理论和掌握土质的承载能力等而进行的试验。试验时需埋设测量元件,试验用的仪器设备要求有较高的精度与灵敏度,为掌握各种因素的数据,要求试验数量较大。科研性试验也可在不同类型的砂箱内做缩小比例的模型试验,但因很难与施工现场情况相符合,故一般还需再做现场真型试验。

**试验项目** 一般有上拔试验、下压试验、上拔或下压加水平荷载(斜向荷载)试验和倾覆试验等。试验项目要根据基础类型、受力状况及试验性质来确定,如杆塔拉线基础仅作上拔试验,自立式塔基础则需作上拔、下压或斜荷载试验,而电杆基础却要作倾覆试验。工程鉴定性的基础试验,需根据设计条件,做最不利情况下的组合荷载试验。科研性的基础试验,为便于分析,总是先作单一荷载的试验,如上拔、下压、水平荷载试验等。

**加载装置** 一般由液压千斤顶、钢梁、反力支座等组成,也有采用汽车吊、卷扬机和支架的。上拔加载装置如图1所示,下压加载装置如图2所示,水平加载装置如图3所示。加载钢梁的强度必须满足基础破坏荷载的1.2~1.4倍的要求,其长度应满足试验基础和反力支座四周的土体不相互干扰的要求。反力支座有承力基座和枕木两种。做破坏试验时反力支座的位移不

得超过25 mm。液压千斤顶平放于基础中心,当采用两个以上的千斤顶时,应有同步加载设备。

**测试装置** 地基中的应力测量,一般用土压力盒测土中法向压力,用摩擦力盒测结构物与土之间的摩擦力,也可在基础内的钢筋上埋设应变片。试验荷载可采用放置在千斤顶上的应力环、压力传感器测定。基础位移可采用

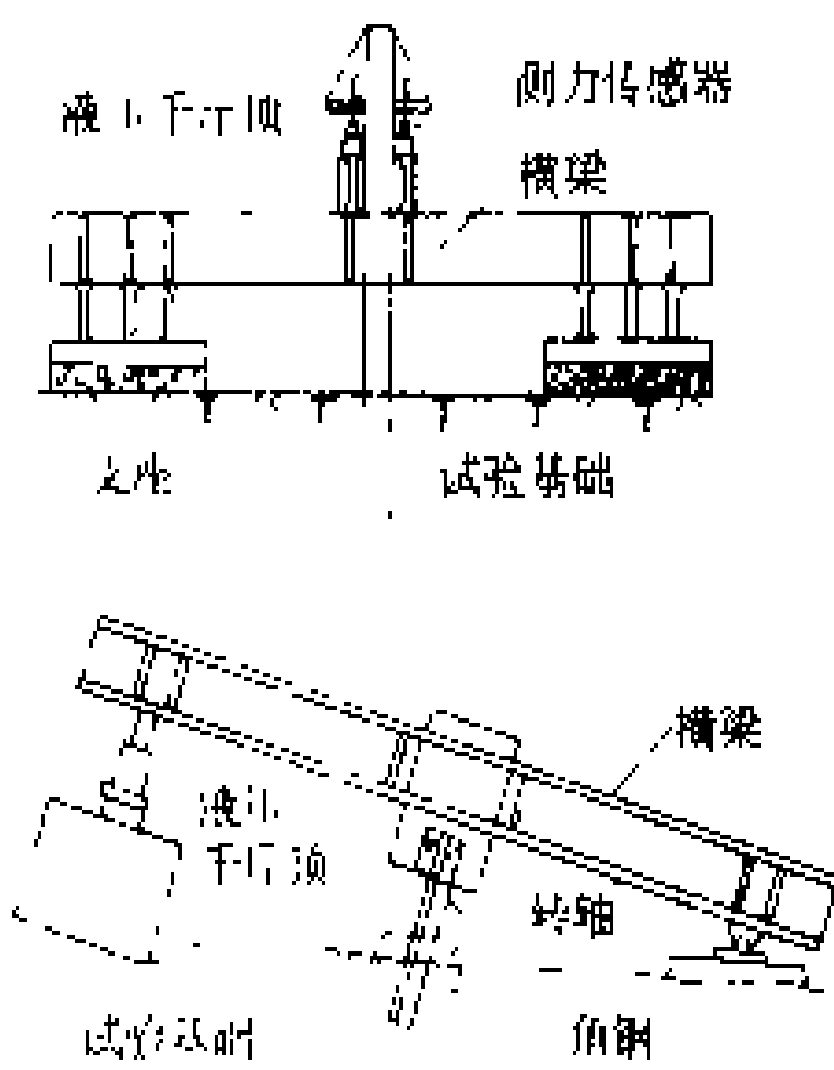


图1 上拔加载装置

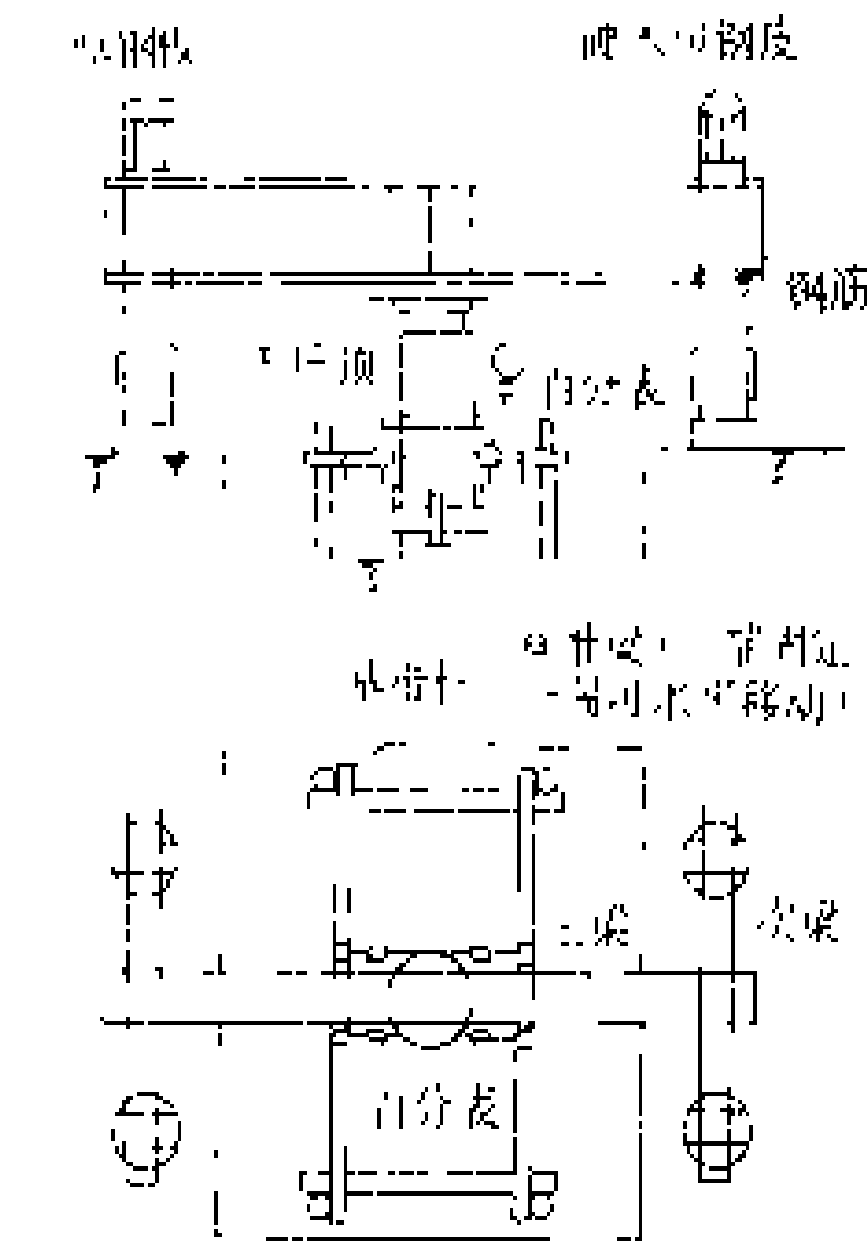


图2 下压加载装置

不同而定。

(1)慢速维持法。又称保持荷载法,采用逐级加载,每级加载都需待基础位移相对稳定后再加下级荷载,直至基础被破坏。每级宜按承载力设计值的  $\frac{1}{10}$  增

载。基础位移相对稳定的标准是每级荷载作用下基础位移每小时内小于0.1~0.5

mm。测读基础位移量的间隔时间:每级加载后隔15 min 读一次,累计一小时后,每隔半小时读一次。慢速维持法主要用于长期荷载作用下的基础,如转角塔、终端塔的塔基。

(2)快速加载法。每隔10~60 min 逐级增加一级荷载,直至基础被破坏,整个试验在2~8 h 内完成,每级荷载增量为预计最大值的1/10~1/15。快速加载法

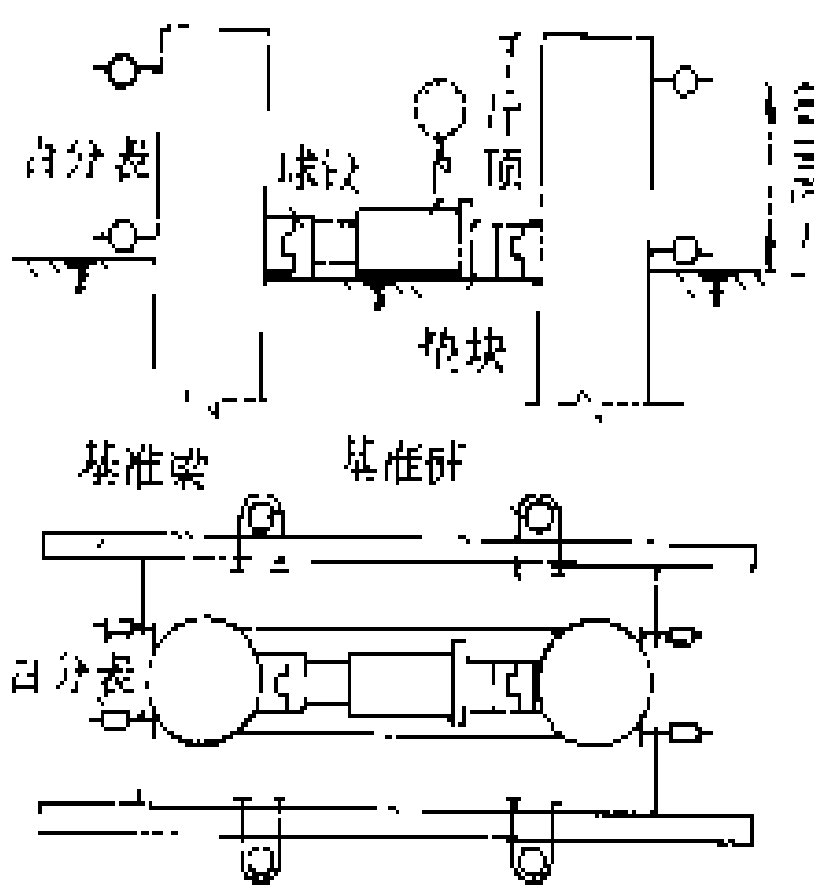


图3 水平加载装置

主要用于短期荷载作用下的基础,如直线塔、耐张塔的塔基。

(3) 循环加载法。取预计最大设计值的 1/10~1/15 作为每级荷载的加载增量,每一级荷载的试验观测要有 3~5 次加、卸载的循环,即加载后保持 5~10 min,作位移等观测记录,然后卸载至零,停 2 min 读残余位移量,如此循环 3~5 次再加下级荷载。每次加载时间尽量缩短,测读位移间隔时间要严格准确,试验不能中途停歇。循环加载法主要用于经受反复荷载作用下的基础,如桩基的水平荷载试验等。

极限承载力。抗拔基础的  $P-S$  曲线往往没有拐点,其极限抗拔力以破坏荷载和允许位移量来确定。确定基础极限荷载方法一般有下列三种:①根据沉降随荷载变化的  $P-S$  曲线,取曲线明显的陡降起始点 [见图 4 (a)] 或两端切线的交点 [见图 4 (b)] 的荷载作为基础的极限荷载;②根据沉降随时间变化的  $S-\lg t$  曲线 (见图 5) 或沉降随荷载变化的  $S-\lg P$  曲线,取曲线尾部出现明显向下弯曲的前一级荷载值作为基础的极限荷载;③根据允许位移量确定极限荷载。允许位移量的取值标准,可根据各地区的经验而定,一般短期荷载作用下的杆塔,地基为一般粘土时,基础允许位移量取 25~30 mm。允许荷载的确定,是将极限荷载除以安全系数,安全系数在杆塔基础设计导则或有关规程中均有规定。

(郑仁坪)

xianlu ganta shiyan  
**线路杆塔试验** (tests of transmission line towers) 对线路杆塔结构的整体或主要部件进行检测,了解其工作状态和承载能力,以验证设计理论和检验加工质量,并发现存在的问题等。根据不同需要,一般有工程鉴定性试验和科研性试验两种。

(1) 工程鉴定性试验,或称工程验收性试验,采用真型试验,按照设计的要求,对杆塔施加荷载,观测杆塔强度及刚度等是否满足工程要求。工程鉴定性试验可在专设的杆塔实验站进行,也可在线路施工现场上进行,一般不必测试杆塔构件的应力。

(2) 科研性试验。凡线路杆塔采用新的材料、新的型式、新的工艺和新的计算理论等,就要进行科研性试验,对杆塔的主要受力构件要测试应力,以便设计、分析。科研性试验目的是验证新技术是否安全可靠,计算理论是否合理。可以先采用模拟试验,即将真型杆塔缩小比例 (一般为 1:5 或 1:10) 在杆塔实验室内进行试验,这样便于观测和测试构件受力情况,节约人力和材料。一般在模拟试验后再作真型杆塔试验。

**试验工况** 一般包括四种工况:①运行情况下的最大风速荷载,要考虑风向垂直于线路和风向与线路走向成 45°或 60°角的情况;②运行情况下的导线、地线的复冰荷载;③断线情况下的导线、地线的不平衡张力;④安装情况下的导线、地线紧线荷载以及起吊安装荷载 (包括附件)。

各国采用的线路设计方法不同,试验时所加荷载要求也不同,有的试验工况经判定其荷载小于其他工况,或对构件设计不起控制作用,也可取消该工况下的试验。

在科研性试验中,完成了规定的试验项目后钢材

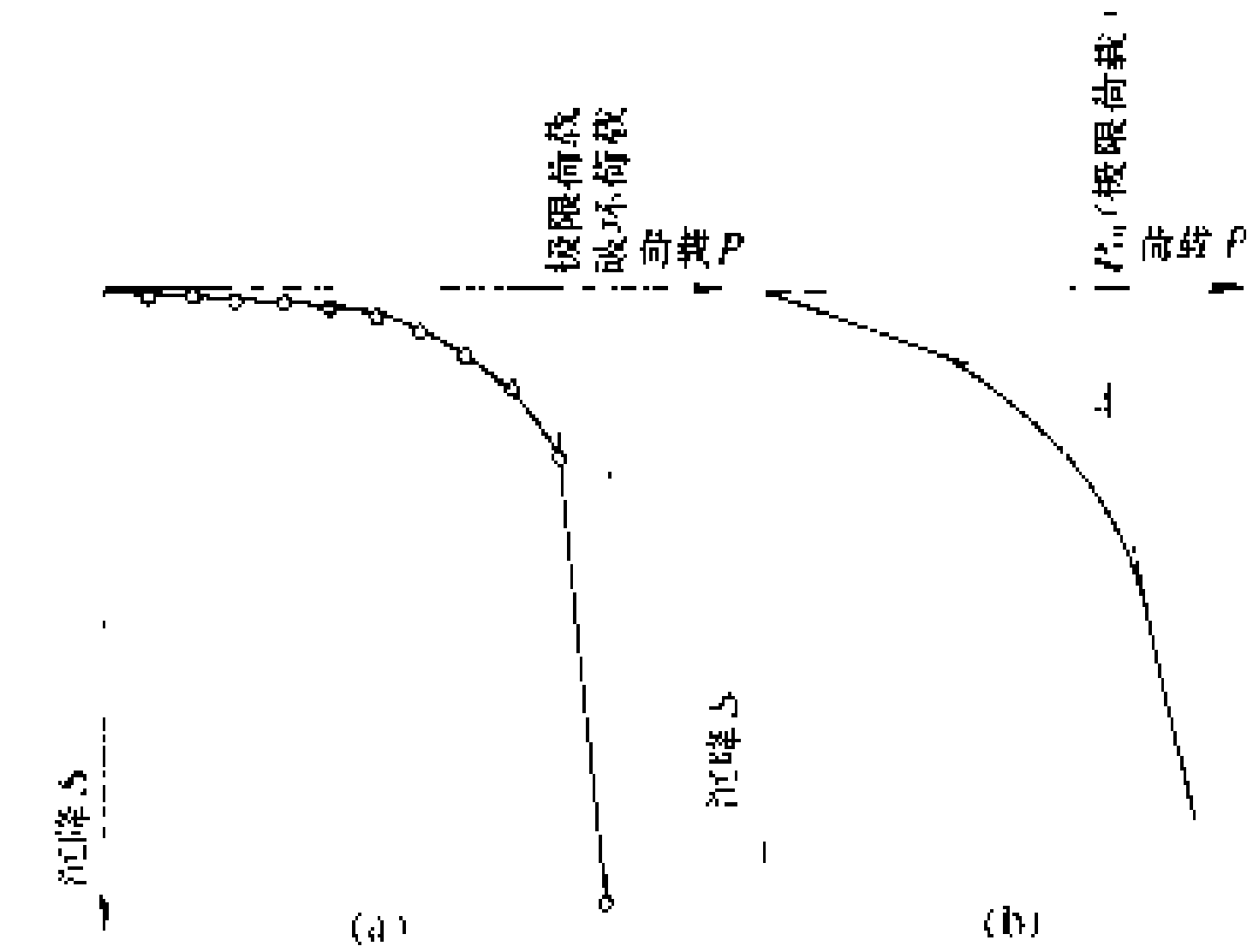


图 4 荷载-位移 ( $P-S$ ) 曲线  
(a) 明显拐点法; (b) 切线交会法

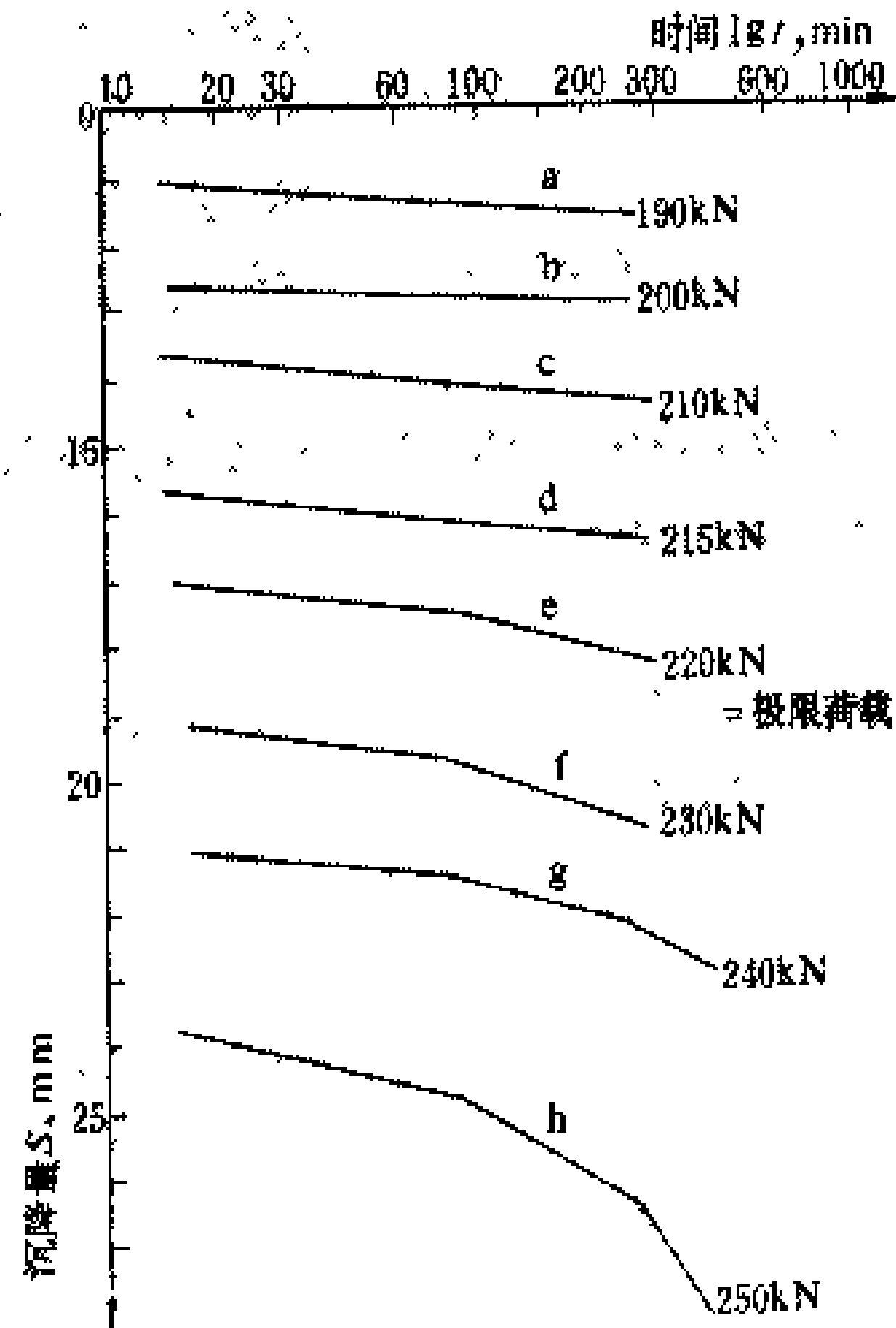


图 5  $S-\lg t$  曲线

**基础承载力的确定** 基础极限荷载的确定,目前还没有统一的方法。当荷载-位移 ( $P-S$ ) 曲线有明显拐点时,可直接取用  $P-S$  曲线陡降起始点的荷载值作为基础的极限承载力。当  $P-S$  曲线无明显拐点时,则需绘制  $S-\lg t$  或  $S-\lg P$  等函数曲线来确定基础的

尚未达到屈服点,或构件尚未丧失稳定,也可继续加荷载作破坏性试验,以观测杆塔破坏情况,以利今后改进设计。

**试验设施** 世界上各工业发达国家均有专设的线路杆塔实验站,该实验站宜建在交通方便和避免无线电干扰的地区,也有的建在山谷中。线路杆塔实验站的主要设备和构筑物是:万能基础、横向和纵向加荷塔、中央控制室、加荷室、测量和控制系统、组装场和起重吊车等。加荷设备为液压千斤顶和卷扬机。线路杆塔实验站一般只做杆塔静载加荷试验。要做断线冲击或软横担(以钢索作为导线横担)杆塔动态受力试验时,还应设置一定长度的线路和若干基杆塔。

**万能基础** 一种可用于试验各种型式、各种电压和各种尺寸的线路杆塔的基础装置。在试验过程中要求该基础保持稳定,不影响试验结果。万能基础的规模和适用范围根据试验杆塔的电电压等级、荷载而定,其外形可分为大块式(见图1)和十字式(见图2)两种。按

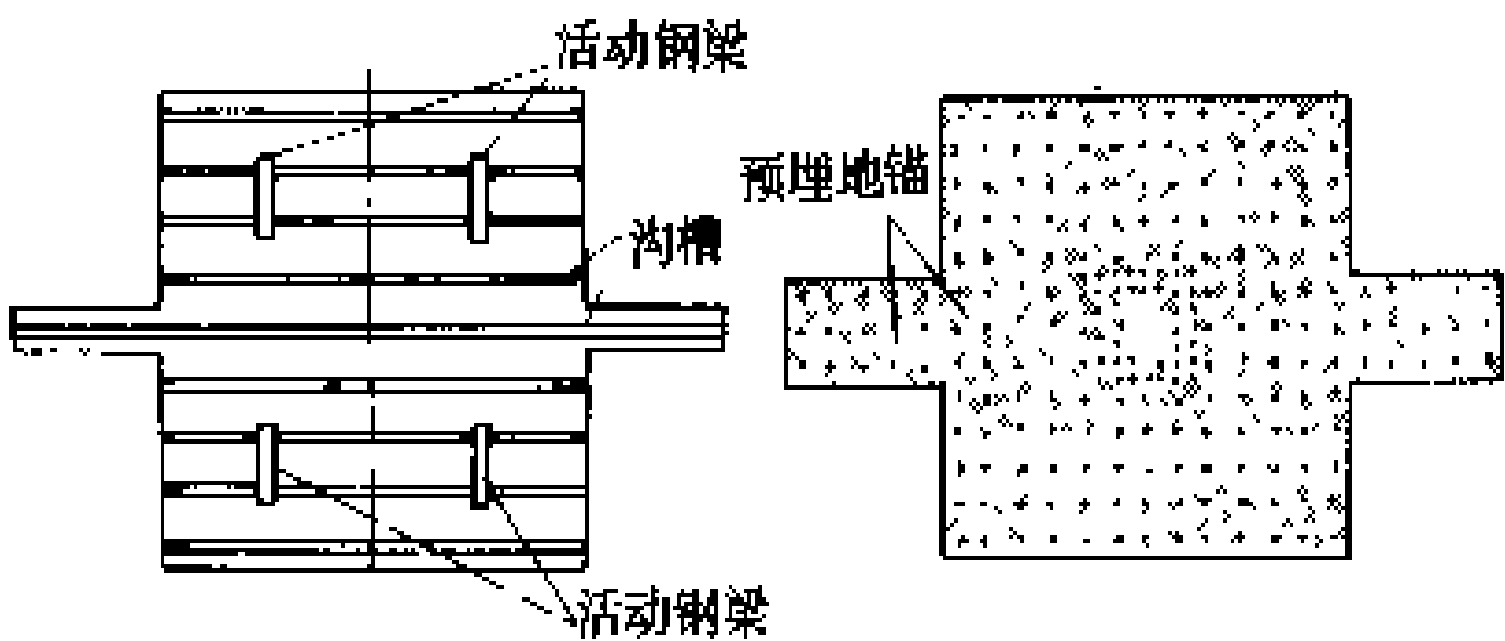


图1 大块式万能基础

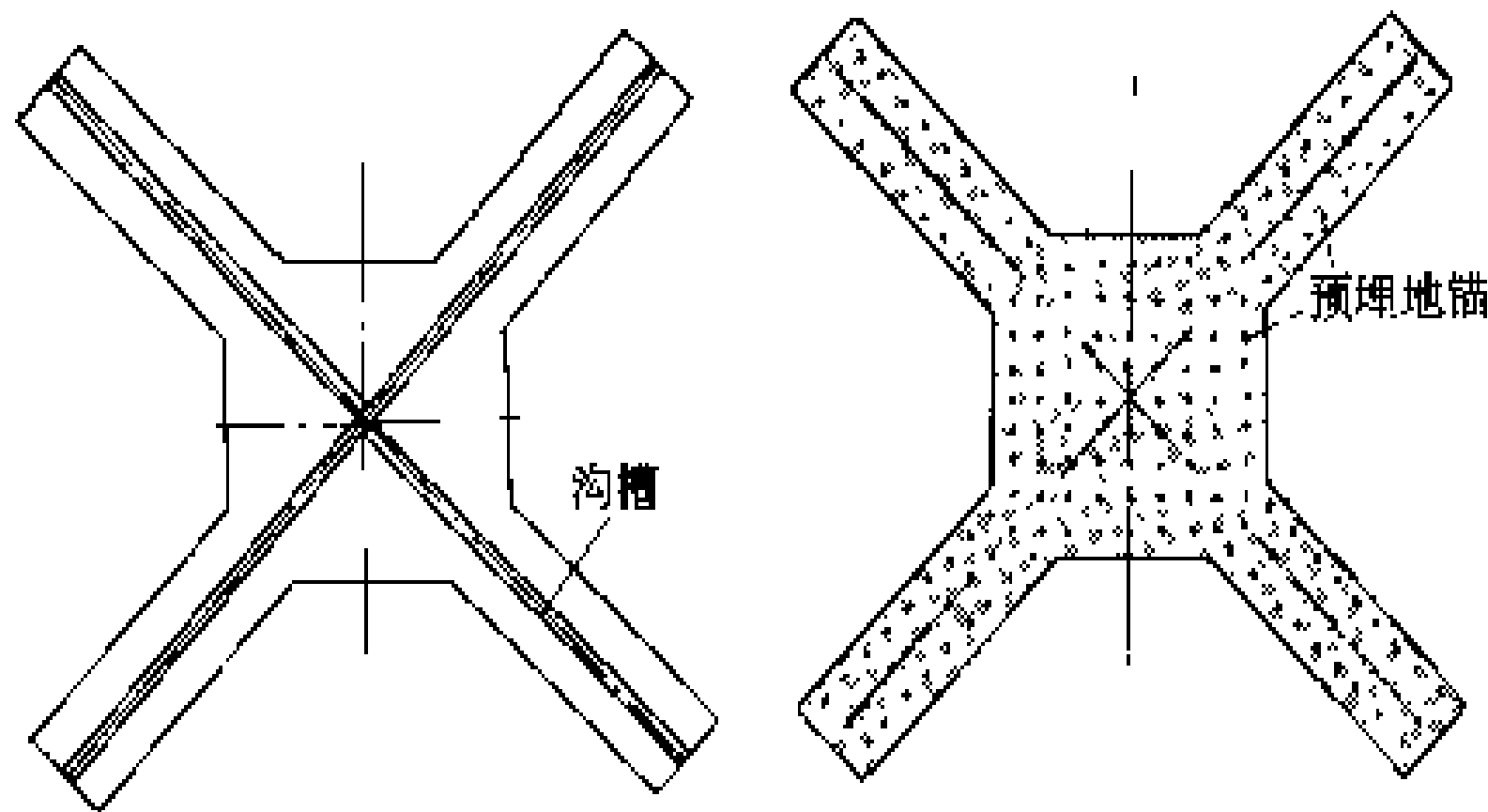


图2 十字式万能基础

基础与试验杆塔的连接型式,万能基础又可分为沟槽式和预埋地锚式。沟槽式是在基础上设置若干条地下沟槽,上面配以活动钢梁,以适应试验杆塔的底部尺寸,再将试验杆塔的塔腿固定在钢梁上。预埋地锚式又有露出基础面的螺栓和埋于基础面下的螺母两种,在试验杆塔的塔腿处设置四块锚板,用锚栓固定,再将试验杆塔的底板固定在锚板上。大块式万能基础适用于正侧面尺寸不同的杆塔,使用范围较广。十字式万能基础仅适用于正侧面尺寸相同的杆塔。

**加荷塔** 对试验塔加载时的支撑结构,也称作反作用力塔。线路杆塔实验站需设置横向和纵向两座加荷塔。加荷塔的高度宜大于被试塔的高度。纵向加荷塔的宽度宜与被试塔的导线横担宽度相近,故纵向加荷

塔的塔身比较宽。横向加荷塔有加荷点位于塔身中间,塔身较窄。如果杆塔实验站位于山谷中间,可利用地形降低加荷塔的高度,或取消加荷塔,直接在岩壁上设置锚固点施加荷载(见图3)。

**测量及控制系统** 主要指受力测量、挠度测量、构件应变测量等和控制系统。

(1)测力系统。作用在杆塔上的垂直力、横向水平力和纵向水平力采用拉力传感器测量,如在荷载点上同时作用垂直力和水平力时可采用角度传感器。在垂直力较小的情况下,也可采用荷重块测量。所有拉力传感器均与协调加载机相连。每次试验前拉力传感器必须进行标定。

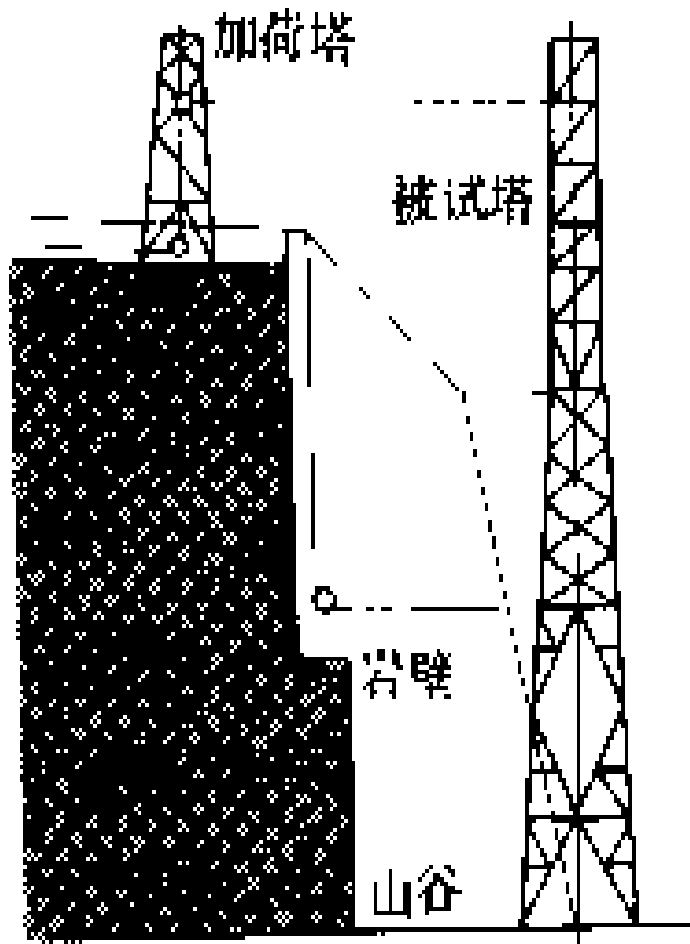


图3 利用山谷地形降低加荷塔的高度

(2)挠度测量系统。测量杆塔挠度一般采用经纬仪,也有的采用先进的光学仪器测量系统。

(3)构件应变测量系统。主要有机械式测试仪和电测仪两大类。在实验室内进行科研性试验时,两种仪器均可使用,在室外进行真型塔试验时多采用电测仪器。电测仪器主要有电阻应变片、静态电阻应变仪和动态应变仪。静态电阻应变仪有手动操作和自动操作两种,自动操作的静态电阻应变仪可同时测出200点以上测点的应变值。动态试验采用动态应变仪和示波器测量,可以记录动态构件受力变化过程。

试验钢筋混凝土或预应力混凝土电杆时,一般采用放大10倍或20倍的测微仪,以观测混凝土裂缝宽度。

(4)控制系统。为提高试验的自动化水平,实验站配备协调加载机遥控液压装置,加荷过程和测试由计算机自动控制完成。

**试验标准及要求** 国际上采用国际电工委员会(IEC)制定的《架空线路铁塔试验标准》。一般应满足下列要求:①凡工程鉴定性试验,要求试验塔的钢材、螺栓的规格和品种质量与工程中的铁塔一致。有的国家还要求试验塔钢材镀层也要与工程中的铁塔相同。②试验塔必须牢固地连接在基础上,不致因基础位移产生铁塔次应力而影响试验准确性。③加荷步骤根据设计方法不同而异,按极限状态设计的,一般以设计荷载为基值,按五级加荷,即50%、75%、90%、95%及100%;按安全系数法设计的,则先按50%、75%、100%三级加荷,达100%以上则按10%递增继续加荷直到超载。④加荷时应防止动力影响,试验中螺栓

滑移导致冲动是许可的。加荷误差应控制在一定范围内,在 50%加荷时允许误差为±4%,75%~100%加荷时允许误差为±2%,100%及以上加荷时不准出现负误差。每次加荷后停歇时间不得少于 1 min。⑤试验合格标准:杆塔试验完毕卸去荷载后,构件无明显局部变形或断裂,杆塔挠度和电杆裂缝在允许范围内。出现螺孔变形或螺杆弯曲是允许的。

(吴 晓)

xianlu jinju shiyan

**线路金具试验** (tests of transmission line fittings) 应用测试手段,对成套金具或其主要部件进行试验研究和检测,以了解其工作状态和承载能力,检验设计、制造和组装质量。试验内容包括机械力学性能、电气性能及化学性能几个方面。机械力学性能试验主要有破坏荷重、振动、握力、磨损、冲击动荷试验及探伤检查等;电气性能试验有温升、电阻、热循环、大电流冲击试验,以及电晕试验、高压电器无线电干扰试验等;化学性能试验有镀锌层耐磨蚀、盐水喷雾试验等。

金具一般分为线路金具、变电金具及电站金具(大电流母线金具)三大类,各种金具的试验项目有所不同,主要根据金具的结构和性能而定。

**破坏荷重试验** 对所有承受载荷的金具(如 U 型挂环、挂板、拉环等),为了解其机械力学性能及在荷载作用下的工作状态,均应进行破坏荷重试验。试验在立式或卧式材料试验机上进行。试验时金具受力情况应与实际运行条件相符。加荷速度(每分钟上升值)不超过试件标称破坏荷重的 10%。加载至标准破坏荷重时金具未破坏为合格。在抽查的一批试件中至少应使一只(一套)拉至破坏为止,以便分析数据,改进设计计算方法或选材。

**振动试验** 对于防振金具(如防振锤、阻尼间隔棒、相间间隔棒等)须进行振动试验,以了解其振动条件下的工作性能。

**防振锤力学性能试验** 包括:①防振锤振动时消耗功率的能力(功率特性)和防振锤振动强度对激励力的关系(响应力特性)的试验;②疲劳性能试验。

(1)试验装置。试验通常在振动台上进行。振动台分为电磁式、液压式及机械式三类,配备有力传感器、

加速度传感器(或位移传感器)及功率测试仪组成的测试系统,为分析、记录数据还配备有模态参数分析仪及微机数据采集系统。

(2)试验方法。将防振锤固定于振动台面。试验时,对第①项试验需控制防振锤夹头的振幅不变,然后改变振动频率,测量防振锤在各频率下消耗功率的大小及响应力的大小,根据测量的数据,将试验结果绘制成以频率为自变量的功率特性及响应力特性曲线。第②项试验应在完成第①项试验之后进行。目前有的国家采用试验频率及振幅不变的条件来测定防振锤的疲劳寿命,也有的国家则采用振幅(速度)恒定,试验频率在防振锤整个工作频率范围内往复变动,当防振锤钢绞线出现疲劳断裂时或防振锤性能发生了大的变化时确认为疲劳,并记录下相应的耐振次数。

**阻尼间隔棒力学性能试验** 间隔棒除抑制次档距振荡外,还对微风振动起阻尼作用,因此试验内容比防振锤的更多。主要有:①垂直振动试验;②顺线疲劳振动、水平疲劳振动及扭转疲劳振动试验;③阻尼性能试验等。

(1)试验装置。振动试验都在室内试验档距上进行。试验方法与试验档距长度有关,采用“功率法”时试验档距不小于 50 m,采用“驻波比法”时档距长度不小于 30 m。

(2)试验方法。将间隔棒固定于分裂导线上,由振动台激励导线振动,考验间隔棒各活动关节处的耐振能力及间隔棒夹头对导线的握力性能。各国试验技术条件不全相同,其范围列于表中。对①、②项试验,在

阻尼间隔棒力学性能试验技术条件

序号	内容	试验张力	试验频率*	振幅**	振动次数**
①	垂直振动	平均运行张力,或为导线计算拉断力的 20%~25%	20~50 Hz	±1 mm	1×10 <sup>6</sup>
②	顺线疲劳振动		3~5 Hz	±50 mm	7×10 <sup>6</sup>
	水平疲劳振动			拉压力 490 N	1×10 <sup>6</sup>
	扭转疲劳振动			±20°	1×10 <sup>6</sup>
③	阻尼性能测试		橡胶衬垫:3~5 Hz; 间隔棒消振试验:5~60 Hz		

\* 试验①的试验频率在微风振动频率范围内选取,试验②的试验频率为次档距振荡频率,试验③的试验频率分别为次档距振荡频率及微风振动频率。

\*\* 振幅及振动次数的数值是日本电气协会由现场试验研究后提出的试验值,可供参考。

要求的振幅条件下,经过规定的振动次数后活动关节不产生损伤、夹头握力满足设计要求为合格。第③项试验可为线路防振设计提供阻尼参数。

**握力试验** 试验目的是检查卡固、接续导线用的各种耐张线夹、悬垂线夹、接续管等金具的紧固力。握力试验在卧式拉力试验机上进行。试件与夹具的有效间距不小于被安装导线外径的 100 倍。试验的加荷速度与破坏荷重试验相同。导线从线夹(或接续管)滑出为不合格。导线在线夹(或接续管出口)线槽处离开原有划印位置,而此时试验荷重仍能继续增加时不认为滑动;当试验荷重保持稳定而导线继续从线夹中滑移则称为滑动。

**冲击动荷试验** 超高压输电线路中使用的金具荷重大,结构复杂,绝缘子串金具应进行断线或断绝缘子串的冲击动荷试验,以校验动荷条件下绝缘子串所有金具的承载能力和存在的薄弱环节。试验前凡能在室内进行试验的所有元件应先作静荷载试验,然后按实际使用条件组装后,在室外试验场的真实线路上进行冲击动荷试验。断线负荷为导线计算拉断力的 20%。

**探伤检查** 通常采用染色探伤、超声波探伤、γ射线探伤等非破坏性检查方法。染色探伤用于对铝及铝合金铸造的金具进行表面裂纹及缺陷的检查,超声波探伤和 γ射线探伤用于金具的浅表或深部缺陷的探伤。染色探伤的原理是利用毛细管现象,使浸液渗入金属缺陷部位。染色探伤属生产厂例行试验,特别是铸造件,应逐件检查后再转入机加工程序。

浸透试验缺陷判断标准,是以公认的标准试验样品和划分缺陷等级作对照判断。

**温升试验** 检验导电的金具通过电流时的温升情况。导电的金具(如接续管、T 型线夹及设备线夹等)在接触不良时会发生过热,造成局部温升过高而使接点老化甚至烧毁。

温升试验在室温为 23~27℃ 的室内进行,导线作水平悬空敷设,按实际使用条件将金具串联于导线回路内。金具上的测温点应选择在试件电气接触部位的中间,导线上的测温点至试件的距离应不小于 1 m。试验时导线通以额定电流,至温度趋于稳定后,测定各被测点的温度。测得的金具温升低于导线温升为合格。

**热循环试验** 检验导电的金具经过通流、断流的反复热循环后,其电气性能(如电阻值的变化、发热温升的变化)的稳定性。需进行热循环试验的金具有接续管、T 型线头及设备线夹等。

热循环试验条件与温升试验的相同。试验电流应能使导线温度升高至 100℃,至少在 5 min 内应保持或超过这个数值。温度稳定后断开电源,让导线冷却至室温,即为一次热循环。经过一定次数的热循环后,测定试件温升特性和电阻变化值。测试结果以试件温升不超过导线温升为合格。

关于热循环次数,各国没有统一规定。中国规定为 120 次。美国标准将热循环次数分成三级:A 级为 500 次,B 级为 250 次,C 级为 125 次。苏联规定不少于 500 次,一般要求 1000~2000 次。

**电阻试验** 由于导电金具接触面的工况、接触压力、腐蚀及导线蠕变引起的松动等因素的影响,会使金具接触点老化而电阻增大,甚至烧毁。因此,需通过试验来实测金具通流时的电阻值的变化。

测量金具电阻的测点应置于金具两侧 5 mm 处的导线上,同时测量与之等长的一段导线的电阻(称等价电阻)。试验采用直流电位差法,分别测量金具电阻及导线电阻,改变电源极性重复测量,以平均值作为测量值。以金具电阻值不超过导线电阻值的 75% 为合格。

**大电流冲击试验** 验证金具过载能力的试验。先对试件通以试验电流进行电阻测试。起始冲击电流的峰值(包括直流分量)为试验电流的 2.5 倍,其试验频率为 40~60 Hz,通过 2 s 之后,再进行电阻试验和拉力试验。

试验电流用示波器测定,并用下式求出

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

式中  $i$  为短时间电流瞬时值, A;  $T=2$  s。

**镀锌层试验** 检查镀锌金具的镀锌层厚度及均匀性的试验。试验时需将试件浸入硫酸铜溶液中,每次浸入时间 1 min,连续多次,每次取出后需洗净、擦干,进行外观检查。对钢、可锻铸铁的镀锌件,中国标准规定为浸入 4 次,美国标准为 6 次。对紧固件需浸入 2 次。以经数次浸入硫酸铜溶液的置换反应后试件表面未露出铁基为合格。

通过测量浸入前后的试件尺寸及重量,可确定锌层厚度及重量。对浸后试件的观测可知镀锌层的均匀性。镀锌层厚度亦可用测厚仪测量。

**盐水喷雾试验** 沿海地区金具的腐蚀比其他环境条件下严重得多,对该地区的金具进行盐水喷雾加速腐蚀试验,其目的是检验金具的抗腐蚀能力。试验在喷雾箱内进行。将试件用酒精或丙酮充分脱脂后安装在试验箱内,以 3% 氯化钠溶液进行喷雾 8 h,停止 16 h 后将试件从试验箱内取出,检查镀层和金属腐蚀情况,如此反复进行三次。盐雾试验前后应测定试件电阻,验证电阻变化情况。

(董吉涛 徐乃管)

xianlu jueyuan shuiping

**线路绝缘水平** (transmission line insulation level) 线路绝缘耐受电压的能力。对架空输电

线路而言，其绝缘水平表现为：①绝缘子的类型及片数；②导线对地（塔头处对地的杆塔构件，档距中央对可能通过的车船等）的空气间隙距离和导线的相间距离。

基本原则及数据 在确定线路绝缘水平时，应首先考虑线路所通过地区的气象、环境条件和雷电强度等因素。由于条件不同，额定电压（或最高工作电压）相同的线路，其绝缘水平会有差异。

线路的绝缘水平不仅影响其本身的经济性与运行可靠性，而且决定了可能进入发电厂、变电所的行波数及其幅值。必要时，可在靠近变电所1~2 km范围内线路上采用过电压防护措施，使得个别杆塔的绝缘水平，与其他部分的不同。

由于线路绝缘是自恢复性的，故允许按故障率进行绝缘设计（见绝缘配合简化统计法）。但为了简便，通常只用惯用法（见绝缘配合惯用法）。

对采用常规杆型的非紧凑型输电线路，可只着重研究其相对地的绝缘水平。作用于相对地绝缘上的电压，除长期最高工作相电压 $u_p$ 外，还有暂时过电压、操作过电压和雷电过电压，分别用 $u_{ex,1}$ 、 $u_{ex,2}$ 、 $u_{ex,3}$ 来表示它们的预期值（计算值）。一些电压等级的输电线路的预期暂时过电压 $u_{ex,1}$ 和预期操作过电压 $u_{ex,2}$ 的值如表所列。表中 $u_{ex,1}$ 和 $u_{ex,2}$ 括号内的数字是它们对 $u_{ex}$ 的倍数。 $u_n=500$  kV的线路，原取 $u_{ex,2}=2.5 \sqrt{2} u_p$ ，今后拟降至 $2.0 \sqrt{2} u_p$ 。至于预期雷电过电压 $u_{ex,3}$ 的值，按中国惯例，在35 kV线路中取300 kV（雷击线路附近地面时的感应雷过电压）。其他电压等级线路的 $u_{ex,3}$ 值则需在选定绝缘子个数后，参照绝缘子的放电电压决定。

预期过电压 $u_{ex,1}$ 和 $u_{ex,2}$ 的值（kV）

$u_n$ 有效值	35	110	220	330	500
$u_p$ 有效值	23.24	73	146	209.6	317.5
$u_{ex,1}$ 有效值	40.25( $\sqrt{3}$ )	87.64(1.2)	175.3(1.2)	272.5(1.3)	412.75(1.3)
$u_{ex,2}$ 峰值	131.5(4)	310(3.0)	619.7(3.0)	815(2.75)	$\frac{1122.7(2.5)}{898(2.6)}$

外绝缘（绝缘子串、空气间隙等）的放电电压 $u_0$ 是指标准气象条件下（气压 $b_0=1.013 \times 10^{10}$  Pa，温度 $t_0=20^\circ\text{C}$ ，绝对湿度 $h_0=11 \text{ g/m}^3$ ）的试验值。在进行绝缘设计时，绝缘的放电电压 $u$ 应根据线路通过地区的实际气象条件按下式换算

$$u = \frac{\delta^n u_0}{K_n^n} \tag{1}$$

式中 $\delta$ 为线路通过地区的空气相对密度，当无实测数据时，可根据线路平均海拔高度 $H$ （m）求得，即取 $\delta$

$\approx \exp\left(-\frac{H}{10000}\right)$ ； $\delta$ 的指数 $n$ ，在雷电冲击（正或负极性）下，取 $n=1$ ，在工频交流电压及正、负极性的操作冲击电压下，当绝缘距离（绝缘子串的净长、空气间隙距离） $S$ 为1~6 m时，取 $n=1.12-0.12 S$ ，当 $S \geq 6$  m时，取 $n=0.4$ ； $K_n$ 为空气湿度校正系数，当线路通过地区的绝对湿度为 $h$ （g/m<sup>3</sup>）时，对工频交流及操作冲击电压，当 $3 \leq h \leq 11$ 时， $K_n=1+0.0125(11-h)$ ，对雷电冲击电压， $K_n=1+0.009(11-h)$ ； $K_n$ 的指数 $w$ ，在工频交流电压下， $h \leq 11$ 时， $w \approx 1.15 \exp[-0.175 S]$ ， $h > 11$ 时， $w=0$ ，在正、负极性操作冲击电压下 $w=1.0865-0.0865 S$ ，在正极性雷电冲击电压下 $w=1.25$ ，负极性时，对棒-板间隙，取 $w=0$ ，其他情况下，取 $w=1.0$ 。

对绝缘的湿放电压，无需进行湿度校正（即 $K_n^w=1$ ）。关于空气密度的校正问题，目前正在进行研究。运行单位暂按 $\delta^n$ 进行校正。

绝缘子片数的选择 选择绝缘子串中的绝缘子片数时，应同时满足下述的两个条件，并取其中较大的一个值。

(1)应有足够的爬电距离，以保证在长期运行电压下不发生闪络，即绝缘子片数

$$n_0 \geq \frac{s_0 \sqrt{3} u_p}{K_x L_0} = \frac{s_0 u_m}{K_x L_0} \tag{2}$$

式中 $s_0$ 为爬电比距； $u_m$ 为电网的最高工作线电压，kV，取有效值； $L_0$ 为每片绝缘子的几何爬电距离，mm； $K_x$ 为绝缘子爬电距离的有效系数，根据试验和运行中各种形状的绝缘子对提高耐受污秽的有效性定出，并以X-4.5型绝缘子的耐污能力为基础，取 $K_x=1.0$ 。

考虑到长期运行电压升高至 $\sqrt{3} u_p$ （例如单相接地）与形成污（雾）闪的条件同时发生的概率很小，所以式（2）既可用于中性点有效接地系统，也可用于中性点非有效接地系统，而且由于此式是大量线路

运行经验的总结，其中自然也包括带有永远丧失绝缘能力的零值绝缘子的线路在内，故不必再增加绝缘子片数留作备用。

(2)应能耐受预期的操作过电压 $u_{ex,2}$ 而不发生闪络，即在选择绝缘子片数时应使其在操作冲击下的50%湿闪络电压 $u_w$ （在过去，特别是当线路额定电压不高时，常用工频电压下的50%湿闪络电压 $u_{w,50}$ 来代替）大于 $u_{ex,2}$ ，即

$$u_w - K u_{ex,2} \tag{3}$$



或 
$$u_{w,50\sim} = K \frac{u_{ex,2}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

式中  $u_w$ 、 $u_{w,50\sim}$  的单位分别为 kV 峰值、kV 有效值。 $K$  为考虑放电概率所取的系数，当  $H \leq 1000$  m 时，可取  $K=1.1$ 。

考虑到线路中绝缘子片数很多，难以及时发现和更换丧失绝缘能力的零值绝缘子，故在按式 (3) 或式 (4) 的要求得出绝缘子片数后还应再增加几片留作备用。

考虑到绝缘子片数对线路的耐雷水平的影响不如其它因素（如杆塔接地电阻、地线对相线的保护角等）显著，又可利用自动重合闸等措施提高供电的可靠性，故一般线路（除 35 kV 线路外）在决定绝缘子片数时，并不考虑雷电过电压。

由于限压措施的逐步完善，通常的情况是按第一个条件式 (2) 所决定的  $n_0$  值，即为实际采用的绝缘子片数。

空气间隙距离的选择 塔头处导线对地线的杆塔构件的空气距离应分别按预期暂时过电压  $u_{ex,1}$ 、预期操作过电压  $u_{ex,2}$  和预期雷电过电压  $u_{ex,3}$  进行选择，并取其最大者。

(1) 按预期暂时过电压  $u_{ex,1}$  选择  $S_1$ 。在预期暂时过电压下间隙  $S_1$ （见图）的放电概率应可忽略不计。假定间隙在暂时（工频）过电压下的放电概率可用正态分布函数进行计算，分布中心为  $u_{50\%,1}$ （间隙  $S_1$  的 50% 工频放电电压）的标准偏差为  $\sigma_1$ ，变差系数  $C_1 = \frac{\sigma_1}{u_{50\%,1}}$ ，则按此要求，在标准气象条件下，间隙  $S_1$  的 50% 工频放电电压  $u_{50\%,1}$  应为

$$u_{50\%,1} = \frac{K_1 u_{ex,1}}{\delta^n (1 - 3C_1)} = K_1 u_p \quad (5)$$

式中  $C_1$  为空气间隙工频放电电压的变差系数，约为 2%； $K_1$  为简化计算时的综合系数，对  $u_n=35, 110 \sim 220, 330 \sim 500$  kV 的线路，当  $H \leq 1000$  m 时分别为 2.5、1.6 和 1.7。

按式 (5) 选择的单个空气间隙  $S_1$  在  $u_{ex,1}$  的作用下的放电概率仅为 0.135%。

(2) 按预期操作过电压  $u_{ex,2}$  选择  $S_2$ 。在预期操作过电压下，间隙  $S_2$ （见图）的放电概率不应超过选定的故障率。假定间隙在操作过电压下的放电概率仍可用正态分布函数计算，则按此要求，在标准气象条件下，间隙  $S_2$  的 50% 操作冲击放电电压  $u_{50\%,2}$  应为

$$u_{50\%,2} = \frac{K_2 u_{ex,2}}{\delta^n (1 - kC_2)} = K_2 u_{ex,2}$$

式中  $C_2$  为空气间隙在操作冲击下放电电压的变差系数，约为 5%； $k$  为根据间隙  $S_2$  在  $u_{ex,2}$  作用下放电概率

所取的值，当此概率为 0.16、0.10 时， $k$  分别为 1、1.3； $K_2$  为简化计算时的综合系数，当  $H \leq 1000$  m 时， $K_2 = 1.2$ 。

(3) 按预期雷电过电压  $u_{ex,3}$  选择  $S_3$ 。在预期雷电过电压下，间隙  $S_3$ （见图）的放电电压应与绝缘子串的雷电放电电压相配合。这一要求的含意是，由于间隙  $S_3$  与绝缘子串相并联， $S_3$  取值过大，徒然造成浪费；选得过小，又会降低线路已具有的耐雷水平。考虑到空气间隙是理想的自恢复绝缘，如发生放电则宁愿其发生在间隙上。中国现行标准规定：对 110~330 kV 的线路， $S_3$  的 50% 雷电冲击放电电压较选定的绝缘子串的 50% 雷电冲击放电电压低 15%。由于空气间隙的放电电压不受污秽的影响，绝缘子串的 50% 雷电冲击放电电压可按非污秽条件决定。 $S_3$  的 50% 雷电冲击放电电压  $u_{50\%,3}$  也就是线路绝缘的预期雷电过电压  $u_{ex,3}$  的值。

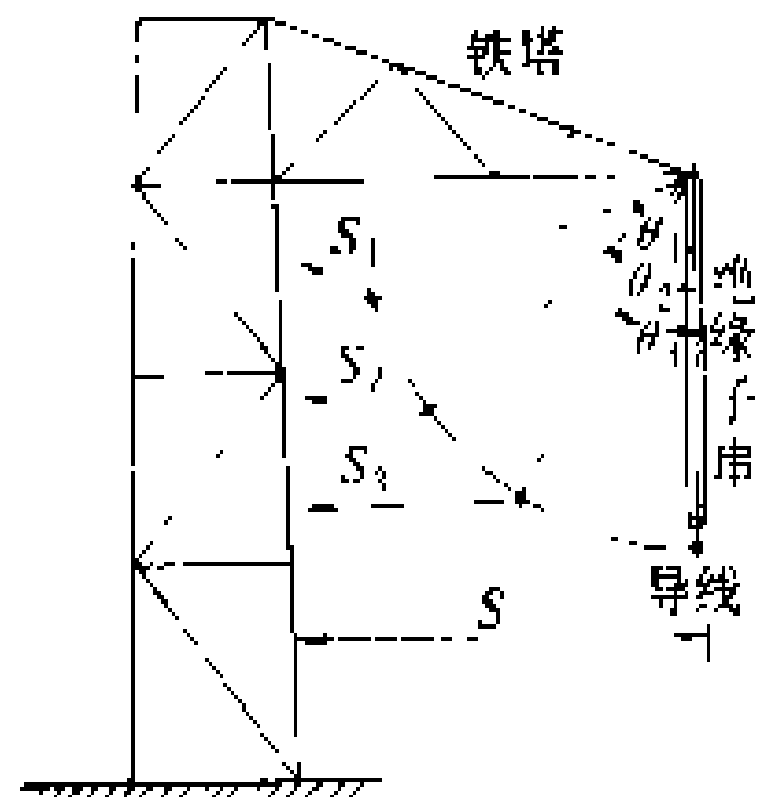
当允许导线摆动时，空气间隙距离的确定应考虑风吹导线使绝缘子串摇摆的不利因数。就线路空气间隙所承受的电压来看，雷电过电压幅值可能最高，内部过电压幅值次之，工频过电压幅值最低。但就作用的持续时间来说，工频过电压最长，内部过电压次之，雷电过电压最短。由于工频过电压的持续时间长，要考虑 15 年一遇的最大风速（约 25~35 m/s），相应的风偏角  $\theta_1$  最大；对内部过电压来说，考虑其持续时间较短，计算用风速采用线路最大风速的 50%，其风偏角  $\theta_2$  较小；对雷电过电压来说，其持续时间极短，因此计算风速一般采用 10 m/s，只在气象条件恶劣时才采用 15 m/s，其风偏角  $\theta_3$  最小（见图）。根据风偏角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  算出由风偏造成的导线的水平位移，分别加上相应的所要求的间隙距离  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ ，其中最大的一个即为导线对接地杆塔的安装距离  $S$ （见图）。

导线档距中央的对地距离，除按绝缘配合要求有一定的间隙距离外，还应考虑可能从线路下方通过的车船高度。此外，还应根据线路的电压等级、布置方式、通过地区的特点校核由地面起一定范围内（ $\leq 2$  m）工频电压下的电场强度，使之不超过规定值。

导线档距中央的对地距离，除按绝缘配合要求有一定的间隙距离外，还应考虑可能从线路下方通过的车船高度。此外，还应根据线路的电压等级、布置方式、通过地区的特点校核由地面起一定范围内（ $\leq 2$  m）工频电压下的电场强度，使之不超过规定值。

**参考书目**  
机械工业出版社 电机工程手册编辑委员会，电机工程手册，第 3 卷：电力系统与电源，北京：机械工业出版社，1982

(王秉钧)  
• 461 •





xianlu lixue shiyanzhan

**线路力学实验站** (mechanical laboratory of transmission line) 对线路及其构件进行力学性能试验的设施。主要可供进行线路上的基础、杆塔、导线、地线、金具的力学试验及线路综合力学特性试验。

**线路杆塔基础试验** 一般多与现场具体地质情况相结合,并在现场进行,不另设固定试验场所。试验的主要内容是观测基础在上拔、下压或倾覆力作用下的机械强度和变形情况,有时为了验证或推导新的基础计算理论,或采用新型基础,也可在实验室内进行模拟试验,即缩小比例在试验箱内试验,这样便于先取得比较规律性的数据。(见线路杆塔基础试验)

**线路杆塔试验** 国内外均在专门设置的杆塔实验站内进行。世界上规模较大的杆塔实验站有:意大利 LECCO 铁塔实验站、美国电力研究所输电线路力学实验场、英国的 CHEADAR 铁塔实验站、法国的 SENS 铁塔实验站以及中国电力建设研究所线路杆塔实验站等。杆塔实验站可对各电压等级、不同型式和尺寸的线路杆塔进行试验。试验的内容主要是检验杆塔的力学强度、刚度或变形,对钢筋混凝土电杆或预应力混凝土电杆还要检验其是否满足抗裂要求。经各种荷载试验后,鉴定杆塔是否满足工程设计要求。一般多采用真型杆塔进行试验。(见线路杆塔试验)

**线路导地线试验** 在制造厂的实验室中进行,也可在力学实验站的实验室内进行。试验的主要内容是测定线路导线及地线的拉断力、弹性系数、耐振能力、蠕变和线膨胀系数等,还可测量导、地线防振装置的消振性能,以便对单导线和分裂导线以及各种大跨越线路的防振方案进行验证和选择。导、地线试验还包括测量直流电阻、交流电阻、允许载流量和电晕试验等电气性能测试项目。(见线路导线试验)

**线路金具试验** 一般在制造厂的实验室中进行。试验的主要内容是测定金具的机械性能,包括破坏荷重、振动、握力、磨损、冲击和探伤等,从而为金具产品质量和可靠运行提供保证。任何新设计、新材料和新工艺在投产前均要作这类试验。金具试验还包括温升、电阻、热循环、大电流冲击、电晕和无线电干扰等电气性能试验,以及镀锌层耐腐蚀、盐水喷雾等化学性能试验。(见线路金具试验)

**线路综合力学特性试验** 同时测试两种或两种以上线路构件的力学特性。一般有下面几种情况:①在断线冲击荷载作用下,导线、地线、金具和杆塔的受力情况;②在导线、地线微风振动、次档距振荡或舞动情况下,导线、地线、金具以及杆塔的受力情况;③在杆塔基础产生上拔、下压或水平位移情况下,杆塔基础和铁

塔的受力情况。

(吴 晓)

xianxing xiezhen guodianya

**线性谐振过电压** (linear resonance over-voltage) 在电力系统线性参数振荡回路中产生的谐振过电压。

**产生机理** 最简单的  $L-C$  串联回路的谐振条件为

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

即

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega$$

式中  $\omega$  和  $\omega_0$  分别为电源角频率和自振角频率。此时回路电流  $I$  和  $L$ 、 $C$  的端部电压  $U_L$  和  $U_C$  均趋于无穷大。

如果存在串联损耗电阻  $R$ , 则谐振时的电流  $I$  与电源电动势  $E$  同相位, 自振角频率  $\omega_0$  接近于  $\omega$ , 此时产生的过电压为  $U_L = U_C = E\omega L/R$ 。因此, 在线性谐振条件下, 损耗电阻是限制过电压的唯一因素。在实际情况下, 即使回路参数只是接近于谐振状态, 也会产生严重的过电压。

在多网孔的振荡回路中, 只要其中任何一个回路的自振角频率等于(无损回路)或接近于(有损回路)电源角频率, 就会发生串联谐振现象。

**空载长线路中的线性谐振过电压** 空载长线路的谐振条件为

$$\frac{\omega l}{v} = \frac{\pi}{2} - \varphi, \varphi = \arctg \frac{x_c}{Z}$$

式中  $l$  为线路长度;  $x_c$  为等效电源的漏抗;  $Z$  为导线波阻抗;  $v$  为波速, km/s。如取  $v$  为光速,  $\varphi$  以度数计, 谐振时最短的导线长度为

$$l = \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\pi\varphi}{180} \right) \frac{v}{\omega} = 1500 - \frac{50\varphi}{3}, \text{ km}$$

因此, 在无感抗  $x_c$  时, 谐振长度为 1500 km。 $x_c$  的存在缩短了导线产生谐振时的最短长度。

不对称接地故障增强了空载线路的电容效应, 从而减小了导线产生谐振时的最短长度。

在谐振条件下, 导线的电晕损耗和变压器的励磁饱和效应将会起到限压作用, 但工频过电压仍会达到很高的数值, 需要采取并联补偿等专门措施加以抑制。

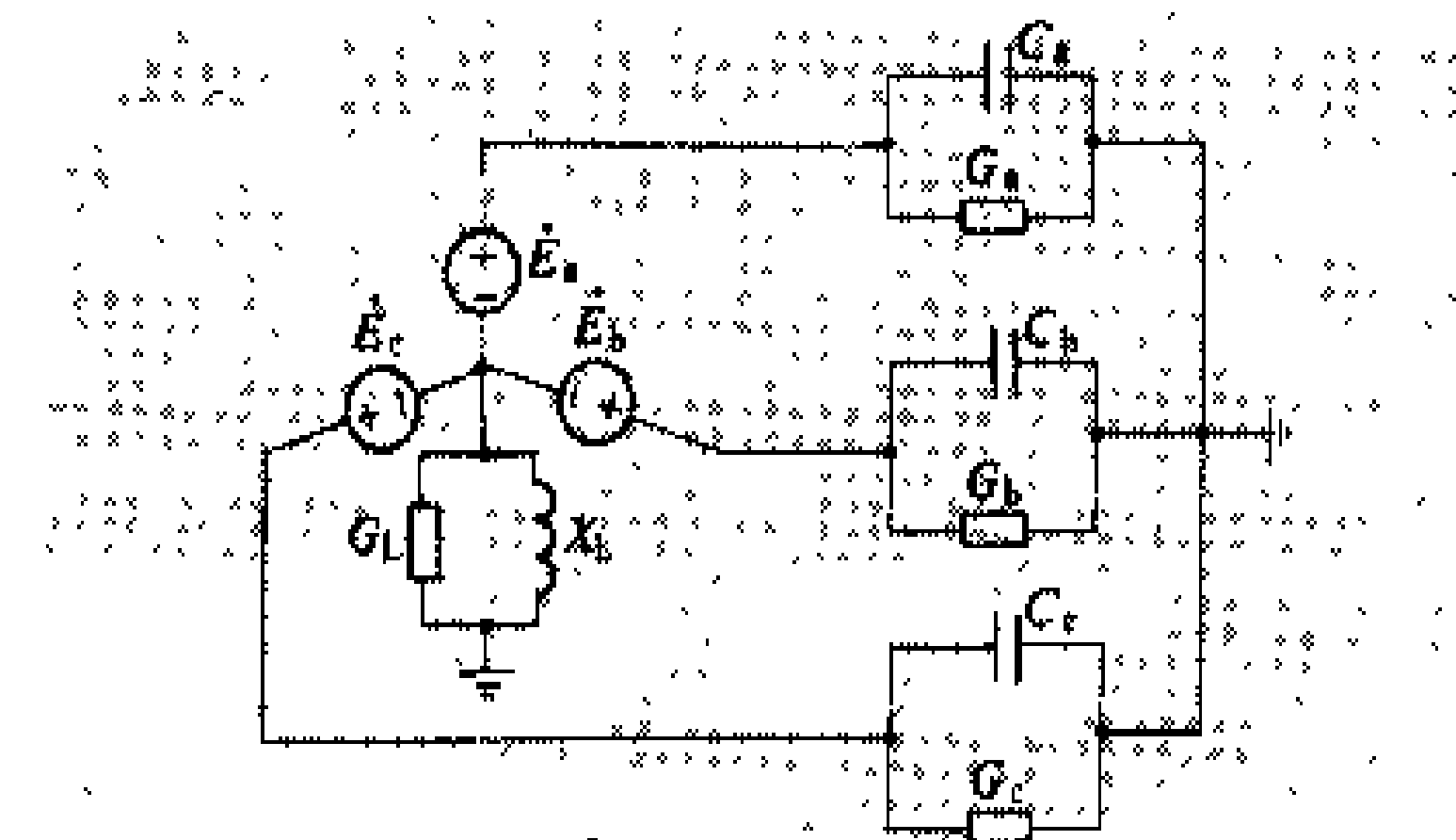
**消弧线圈引起的线性谐振过电压** 图中  $X_L$  为消弧线圈的感抗,  $G_L$  为其等效损耗电导,  $E_a$ 、 $E_b$  和  $E_c$  为电源变压器的对称电动势,  $C_a$ 、 $C_b$  和  $C_c$  为三相导线的对地电容,  $G_a$ 、 $G_b$  和  $G_c$  为三相导线的对地电导。由于导线不换位, 三相电容不相等。在不接  $X_L$  的情况下, 变压器中性点产生不对称电压  $\dot{U}_w$  为

$$\dot{U}_{bd} = \frac{-K_c \dot{E}_s}{1 - jd_0} \approx -K_c \dot{E}_s$$

$$d_0 = \frac{G_a + G_b + G_c}{3\omega C_0}, C_0 = \frac{C_a + C_b + C_c}{3}$$

$$K_c = \frac{C_a + a^2 C_b + a C_c}{3C_0}, a = \exp\left(j\frac{2\pi}{3}\right)$$

式中  $d_0$  称为导线阻尼率,  $K_c$  称为不对称系数。架空线路的  $d_0$  约为 3%,  $K_c$  可达 1.5% 以上。



消弧线圈补偿电力系统的线性谐振接线图

接入  $X_L$  后, 变压器中性点位移电压从  $U_{bd}$  升至  $U_0$ , 如下式

$$\dot{U}_0 = \frac{-K_c \dot{E}_s}{v_c - jd}, U_0 \approx \frac{U_{bd}}{\sqrt{v_c^2 + d^2}}$$

$$d = d_0 + \frac{G_L}{3\omega C_0}, v_c = 1 - \frac{1}{3X_L \omega C_0}$$

式中  $d$  为补偿电力系统的阻尼率, 35 kV 电力系统的  $d$  值在 5% 以上;  $v_c$  称为脱谐度。谐振条件为  $v_c = 0$ ,

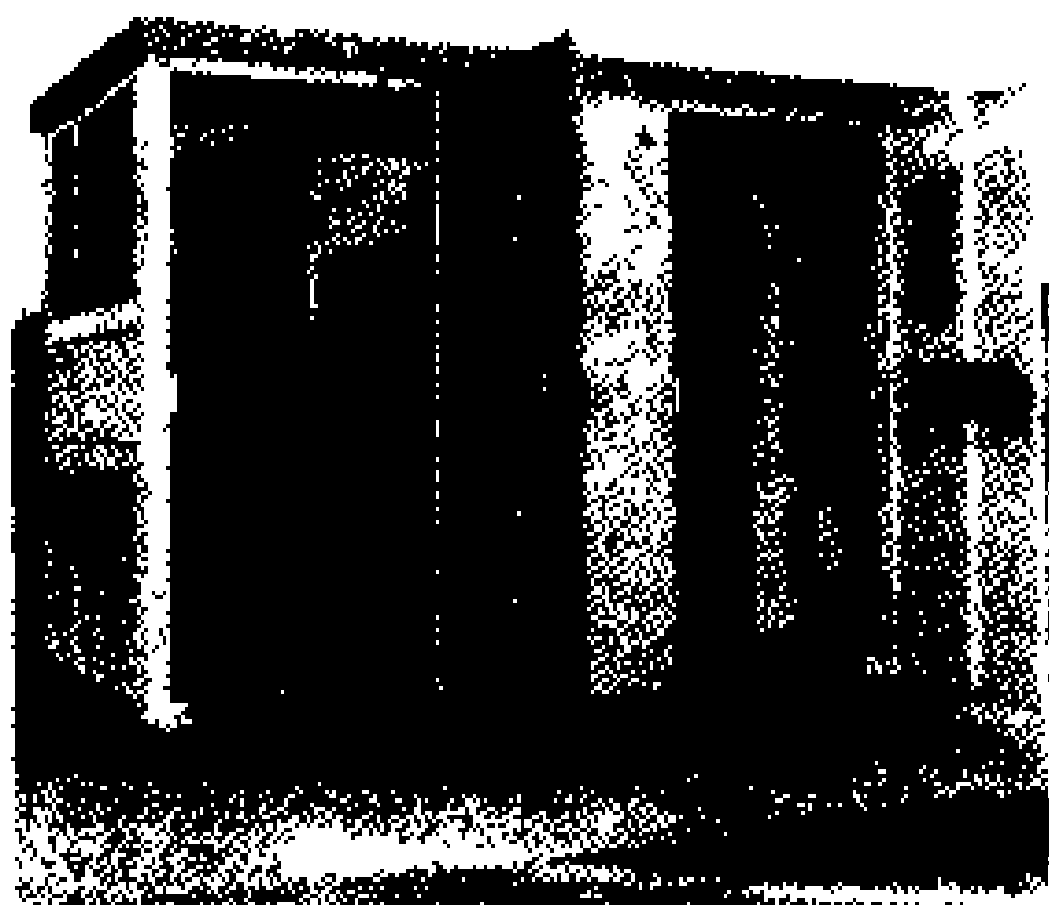
此时  $X_L = \frac{1}{3\omega C_0}$ , 电力系统处在全补偿状态,  $U_0$  受损耗电阻的限制:  $U_0 \approx U_{bd}/d$ , 如  $d = 5\%$ , 则  $U_0$  等于  $U_{bd}$  的 20 倍。在  $K_c$  较大时,  $U_0$  可能接近于  $E_s$ , 而正常运行时的  $U_0$  值不应超过  $0.15E_s$ , 故需设法减小  $K_c$  值, 并使  $v_c \neq 0$ , 即使系统脱离谐振状态。  $v_c > 0$  时称欠补偿, 此时  $1/X_L < 3\omega C_0$ , 如果发生断线, 对地电容减小, 会使系统又接近于谐振状态, 甚至可能发生铁磁谐振现象(见铁磁谐振过电压和断线谐振过电压), 故实际常取过补偿方式, 即  $v_c < 0$ 。由于电力系统中的许多出线经常进行切换操作, 对地电容发生变化, 故需针对不同的运行方式改变消弧线圈的分接头, 即制订具体的调谐方案。

(陈维贤)

xiangshi biandianzhan

**箱式变电站** (cubicle substation; package substation) 将电力变压器和高、低压配电装置等设备组合在一个或几个箱体内部的可吊装运输的配电变电所。箱式变电站的成套性强, 安装周期短, 节省占地。有的箱式变电站使用干式变压器、难燃性电容器和

不用油的断路器, 以提高防火性能。箱式变电站在配电网内, 既可连接为放射式供电, 又可连接为环网式供电。箱体造型和颜色通常还具有美化环境的作用(见图)。



箱式变电站

**结构类型** 按照高压配电装置的结构型式, 箱式变电站可分为气体绝缘封闭式、空气绝缘开关柜式和开关元件组装式三种类型。

(1) 气体绝缘封闭式。高压充气开关柜在箱式变电站中的应用型式。目前多采用  $\text{SF}_6$  气体绝缘, 其充气压力约为  $0.02 \sim 0.05 \text{ MPa}$ , 采用真空断路器或六氟化硫断路器, 有的还将连接变压器的导线采用气体绝缘封闭结构。这种结构型式特别适用于 35 kV 级的箱式变电站, 其尺寸紧凑, 不受大气环境影响, 检修周期长, 运行可靠。

(2) 空气绝缘开关柜式。常规的开关柜在 10 kV 箱式变电站中的应用型式。高压开关设备用真空、 $\text{SF}_6$  型断路器或负荷开关, 也常用产气负荷开关和少油断路器。因其结构简单, 价格低廉, 特别适应高压主接线多变的要求。但因易受大气条件影响, 运行可靠性较低。

(3) 开关元件组装式。常用于农村配电网终端的小容量箱式变电站。高压配电装置不另配柜, 直接组装在箱内。一般采用高压跌落式熔断器或负荷开关-熔断器组合电器作为高压开关控制和保护设备。这种结构型式比较简单, 造价较低。

**主变压器类型** 箱式变电站内所装的主变压器有多种类型, 目前国际上主要采用环氧树脂浇注结构的干式变压器和可燃油变压器, 中国还有采用油浸式变压器的。主变压器大都为无励磁调压, 也有的为有载调压。

箱式变电站外壳采用铝合金板、钢板、钢筋混凝土预制板、塑料板等金属或非金属材料制成, 并具有防潮、通风、隔热措施。为防止变压器箱内部温度过高, 采取自启动散热措施。封闭式箱式变电站的防护不小于 IP2X 防护等级。箱体分为带操作走廊(即工作人员可在箱内操作)和不带操作走廊两种。

**发展趋势** 20 世纪 40 年代, 世界上一些国家开

始研制和应用箱式变电站。70年代起,一些工业发达国家已普遍采用。中国在80年代初开始生产箱式变电站,目前仅限于生产10kV及以下电压等级的箱式变电站,属于无人管理变电站。随着电子技术的发展,将逐步实现对箱式变电站的遥控操作和自动化电力计量抄表。近年来,箱式变电站的体积和发热在不断增大,为此,正向着将变压器露天安装,而只将高、低压配电装置装在1~2个箱内的组合式变电站方向发展。

参见彩图插页第27页84图。  
(顾宪鸿)

xiangmo bianhuanfa  
**相模变换法** (phase-model transformation)  
在波过程计算中,借助于矩阵的对角线变换把  $n$  个平行多导体系统中相互关联的相量系统(即实际系统)的电压  $(u_1, u_2, \dots, u_n)$  和电流  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$  转变为  $n$  个独立的模量系统的电压  $(u_{m1}, u_{m2}, \dots, u_{mn})$  和电流  $(i_{m1}, i_{m2}, \dots, i_{mn})$ ,以简化计算过程的方法。

相量系统的波动方程为

$$\frac{\partial^2 [\mathbf{u}]}{\partial x^2} = [\mathbf{L}][\mathbf{C}] \frac{\partial^2 [\mathbf{u}]}{\partial t^2} \tag{1}$$

$$\frac{\partial^2 [\mathbf{i}]}{\partial x^2} = [\mathbf{C}][\mathbf{L}] \frac{\partial^2 [\mathbf{i}]}{\partial t^2} \tag{2}$$

式中:  $[\mathbf{u}] = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$ , 称为相量电压矩阵;  
 $[\mathbf{i}] = [i_1, i_2, \dots, i_n]^T$ , 称为相量电流矩阵;

$$[\mathbf{L}] = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & L_{22} & \cdots & M_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \cdots & L_{nn} \end{bmatrix}, \text{称为电感系数矩阵};$$

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1n} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \cdots & \beta_{nn} \end{bmatrix}, \text{称为电容系数矩阵};$$

$L_{kk} (k=1, 2, \dots, n)$  为导线  $k$  单位长度的自电感;  $M_{km} = M_{mk} (k=1, 2, \dots, n; m=1, 2, \dots, n; m \neq k)$  为导线  $k$  和导线  $m$  间单位长度的互电感;  $\beta_{kk} (k=1, 2, \dots, n)$  为导线  $k$  单位长度的自静电感应系数;  $\beta_{km} = \beta_{mk} (k=1, 2, \dots, n; m=1, 2, \dots, n; m \neq k)$  为导线  $k$  和导线  $m$  间单位长度的互静电感应系数。

求出矩阵  $[\mathbf{L}][\mathbf{C}]$  的对角线变换矩阵  $[\mathbf{S}]$  (也称电压转换矩阵)和矩阵  $[\mathbf{C}][\mathbf{L}]$  的对角线变换矩阵  $[\mathbf{Q}]$  (也称电流转换矩阵),将式(1)和式(2)转化为

$$\frac{\partial^2 [\mathbf{u}_m]}{\partial x^2} = [\mathbf{Y}]^2 \frac{\partial^2 [\mathbf{u}_m]}{\partial t^2} \tag{3}$$

$$\frac{\partial^2 [\mathbf{i}_m]}{\partial x^2} = [\mathbf{Y}]^2 \frac{\partial^2 [\mathbf{i}_m]}{\partial t^2} \tag{4}$$

式中  $[\mathbf{u}_m] = [\mathbf{S}]^{-1} [\mathbf{u}] = [u_{m1}, u_{m2}, \dots, u_{mn}]^T$ , 称为模量电压矩阵;  $[\mathbf{i}_m] = [\mathbf{Q}]^{-1} [\mathbf{i}] = [i_{m1}, i_{m2}, \dots, i_{mn}]^T$ , 称为模量电流矩阵;  $[\mathbf{Y}]^2 = [\mathbf{S}]^{-1} [\mathbf{L}] [\mathbf{C}] [\mathbf{S}] = [\mathbf{Q}]^{-1} [\mathbf{C}] [\mathbf{L}] [\mathbf{Q}]$ , 为对角线矩阵。式(3)和式(4)即为模量系统的波动方程,式中的模量电压和模量电流都是独立的量。

自式(3)和式(4)解得模量电压  $[\mathbf{u}_m]$  和模量电流  $[\mathbf{i}_m]$  后,利用电压变换矩阵  $[\mathbf{S}]$  和电流变换矩阵  $[\mathbf{Q}]$  即可求出相量系统的电压  $[\mathbf{u}]$  和  $[\mathbf{i}]$ , 即有

$$[\mathbf{u}] = [\mathbf{S}][\mathbf{u}_m] \tag{5}$$

$$[\mathbf{i}] = [\mathbf{Q}][\mathbf{i}_m] \tag{6}$$

均匀换位的三相架空线具有相同的电压变换矩阵和电流变换矩阵,即  $[\mathbf{S}] = [\mathbf{Q}]$ 。常用的变换矩阵有以下几种形式。

(1) 对称分量变换,此时取

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中  $a = e^{j2\pi/3}$ 。

(2)  $\alpha\beta 0$  变换,此时取

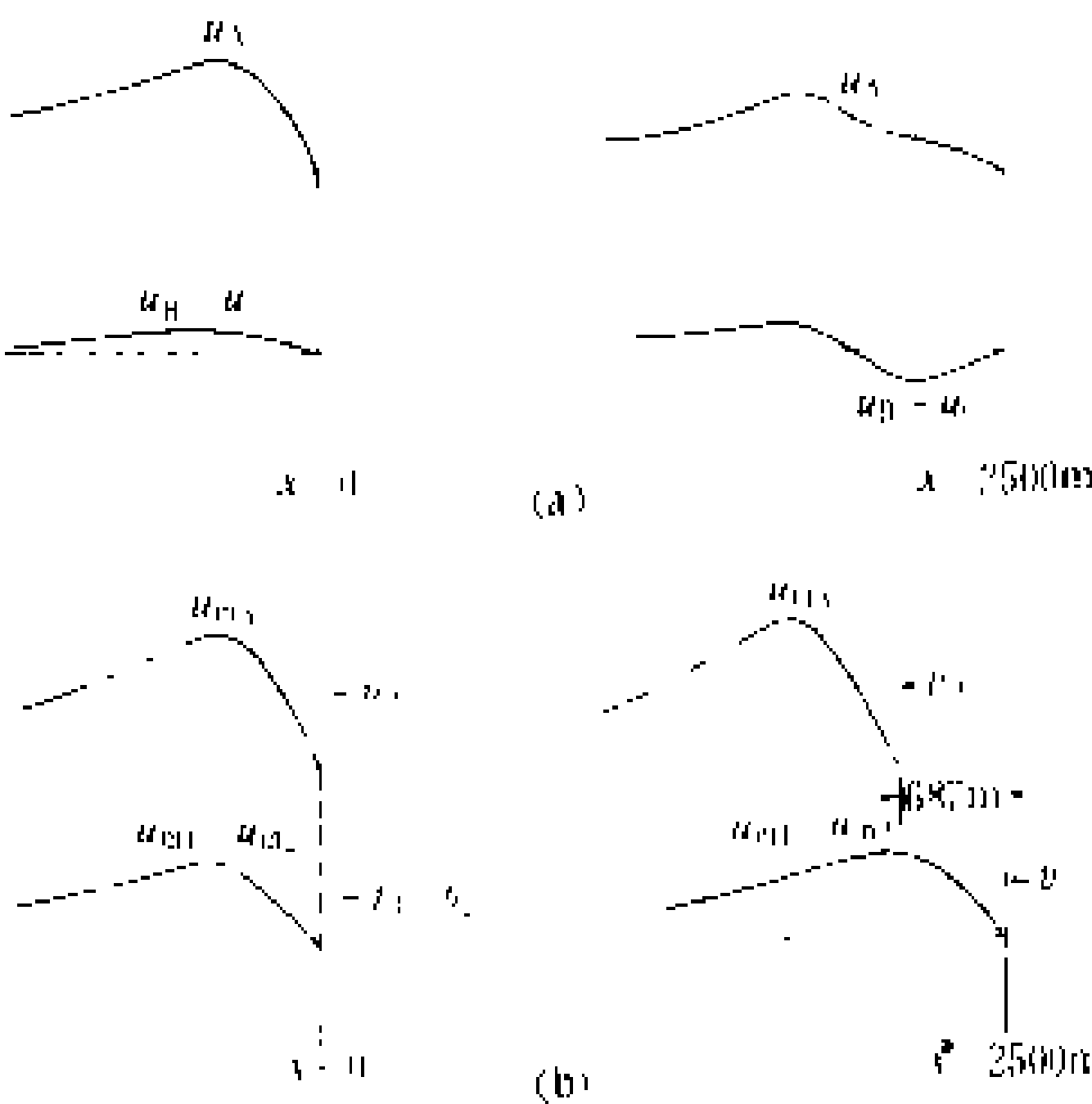
$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -2 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

(3)  $Y\delta 0$  变换,此时取

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

(4) 卡伦鲍尔变换,此时取

$$[\mathbf{S}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$



波在传播过程中的变形  
(a) 相量系统; (b) 模量系统

波在模量系统中可以有多个传播速度,这就使得

波在相量系统中传播时也会出现几种不同的波速，造成波在传播过程中的变形。当三相架空线均匀换位并考虑大地为非理想导体时，模量系统中存在两种波速。图为雷击 A 相导线，波传播 2500 m 后的变形情况。图中相量系统的电压用  $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$  表示， $u_A$  为雷击电压， $u_B$  和  $u_C$  是 A 相受雷击后耦合到 B 相和 C 相的电压。模量系统的电压用  $u_{m1}$ 、 $u_{m2}$ 、 $u_{m3}$  表示，可由卡伦鲍尔变换得出。如果认为大地为理想导体，则在模量系统中只有一个波速，如果再不计导线的损耗，则波在传播过程中不会发生变形。

(陈慈莹)

xiangxu fanzhuan

**相序翻转** (phase overturn) 见断线谐振过电压。

xiangbi dianlan zhongduan

**象鼻电缆终端** (elephant cable terminal)

与变压器直接相连用作变压器高压出线接口的一种电缆终端，又称变压器电缆终端。

一般变压器的高压侧都用瓷套管连接电源进线，需要较大的相间和对地空间，对空间狭窄场所(如水电站的变压器室、人行街道的杆上变压器)很不适应。与变压器直接连接的电缆终端的相间和对地距离都很小，适合与狭窄场所的变压器连接。象鼻电缆终端按其结构型式不同可分为直连式和油箱式二类。

(1)直连式。电缆终端的瓷套管深入到变压器箱体内，变压器高压绕组的引线直接与瓷套管的接线梗相连。这种连接方式的优点是省去了变压器的出线瓷套管，减少了变压器的部件。这种直连式象鼻电缆终端早期常用在 10 kV 及以下的配电变压器中，目前已制成适合于大型变压器的自顶部插入的型式，尺寸紧凑，在水电站室内变压器中用得较多。

(2)油箱式。在变压器外壳上装设一只过渡油箱，使变压器的出线套管伸入油箱内，电缆终端的瓷套管也伸入油箱内，用软跨接线连接二只瓷套管的接线梗，以独立的油枕保持过渡油箱内的油压稍大于大气压力。这种连接方式的优点是在检修时只需排放少量的过渡油箱内的存油，不涉及变压器内绝缘油，便于拆装，其缺点是变压器多了一只过渡油箱，使得其体积更庞大。

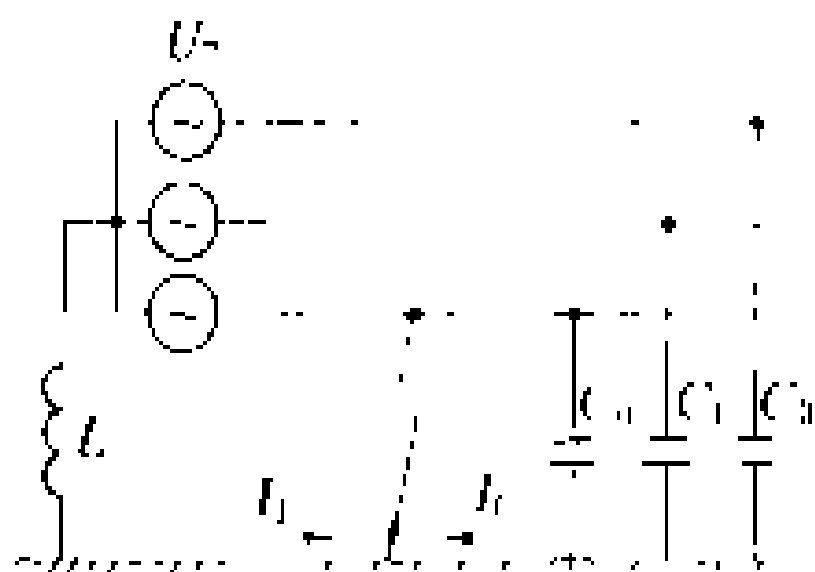
象鼻电缆终端的发展起源于铁甲封闭开关。20 世纪 30 年代起将电缆与铁甲封闭开关连接的方式应用到电缆与配电变压器的连接，其时变压器体积较小，又需保持油浸纸绝缘电缆的弯曲半径，电缆终端形似大象头部，因而得名。虽然近代电缆与巨型输电变压器成

直角形的连接，但仍沿用传统称谓——象鼻电缆终端。  
(李益芬)

xiaohu xianquan

**消弧线圈** (arc-suppression coil) 用来

补偿中性点不接地系统中由于单相接地故障而产生的线对地容性电流的一种中性点接地的电抗器。消弧线圈的铁芯设有气隙以保证电感值之线性，线圈设有抽头以调节电感量。消弧线圈的作用是减少单相接地电流，促成接地电弧自熄，即在一定程度上具有自动消除接地电弧的功能。消弧线圈是 1916 年德国 W. 彼得森 (W. Petersen) 首先提出的，故又称彼得森线圈。在中性点不接地系统中，正确使用消弧线圈，能有效地自动消除大部分单相瞬时接地故障，大幅度减少跳闸率和设备损坏率，可明显提高供电的可靠性。



如图所示，系统发生单相接地故障时，如果不接消弧线圈，则流经故障点的电流  $I_c$  是电容性的，可写成

$$I_c = 3\omega C_0 U_\phi$$

式中  $\omega$  为工频电源的角频率； $C_0$  为线路每相对地电容； $U_\phi$  为系统运行相电压。接入消弧线圈后，则尚有感性补偿电流  $I_L$  通过接地故障点， $I_L$  可写成

$$I_L = \frac{U_\phi}{\omega L}$$

式中  $L$  为消弧线圈的电感。此时，流过接地点的电流是  $I_c$  和  $I_L$  之差，即

$$I_r = I_c - I_L = U_\phi \left( 3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right)$$

称为残流。调节消弧线圈的电感  $L$ ，使  $\frac{1}{\omega L} = 3\omega C_0$ ，即  $I_L = I_c$ ， $I_r = 0$ ，这种运行状态称为消弧线圈的全补偿运行状态。相应地，当  $I_L < I_c$  时，称为欠补偿运行状态； $I_L > I_c$  时，称为过补偿运行状态。

表征消弧线圈补偿程度的物理量是消弧线圈的脱谐度  $\nu$ ，有

$$\nu = \frac{I_r}{I_c} = 1 - \frac{1}{3\omega^2 LC_0}$$

$\nu = 0$  为全补偿运行状态； $\nu > 0$  为欠补偿运行状态； $\nu < 0$  为过补偿运行状态。 $\nu$  值愈小，流经接地点的残流愈小，而且残流过零后接地点恢复电压的增长速度愈慢，这些都有利于接地电弧的熄灭。但消弧线圈不能运行在  $\nu = 0$  的全补偿状态，因为在正常运行时它与导线对

地电容正好形成线性谐振,使系统中性点产生不能容许的位移电压(见线性谐振过电压)。 $\nu$ 值也不宜太大,要求选取适当的 $\nu$ 值,使单相接地时的残流不大于10A。

实际运行中的消弧线圈通常调整在过补偿状态,并制订详细的调谐方案。当发电机中性点装有消弧线圈时,其过补偿脱谐度不能太小,以免形成电容传递过电压的串联谐振电路。若装设消弧线圈的变压器仅有一条出线,在该线路发生永久性不对称接地故障时,断路器将切除线路,在此过程中可能会产生类似切空变的截流现象,出现过电压。为此,要装设式避雷器以保护消弧线圈,该避雷器即使在非雷雨季节也不能退出运行。

消弧线圈的通过功率为 $U_0 I_c$ ,  $I_c$ 要根据电力系统5年左右的发展规划确定,同时考虑过补偿运行。消弧线圈的实际容量 $W$ 应按下列式计算,即

$$W=1.35U_0 I_c$$

消弧线圈在满负荷下的最大连续运行时间一般设计为2h。

在10 kV系统单相接地电流大于30 A,35 kV及以上系统单相接地电流大于10 A的情况下,应装设消弧线圈。消弧线圈应装在零序阻抗较小的变压器中性点上。中性点上装有消弧线圈的Y,d接线的双绕组及三绕组变压器,其三相总容量不应小于消弧线圈容量的2倍,三绕组变压器任一绕组容量不得小于消弧线圈的容量。而中性点装有消弧线圈的内铁芯式Y,y接线的变压器,其三相总容量不应小于消弧线圈容量的5倍。此外,不要将多台消弧线圈集中装于系统的某一区域,以保证系统在任何运行方式下,不致失去补偿。

(方 瑜)

xiaoleiqi

**消雷器** (lightning eliminator) 一种装于高塔或高层建筑物上部用以削弱雷击的强度和消减雷击概率的防雷装置。近来已试用在难于用避雷针实现可靠的保护,或用避雷针保护仍易因感应和反击造成事故的场合(如电子计算机房以及易燃易爆设施等),以取得实践经验。消雷器应有足够的装设高度,一般要在45m以上,分导体型和半导体型两种。

**导体型消雷器** 利用尖端在雷云电场中产生电晕电流和空间电荷,使雷云电荷被部分中和或在向下放电时被空间电荷部分中和(广义中和)。空间电荷还能对被保护物作一定屏蔽,起到扩大消雷器保护范围的作用。导体型消雷器分多短针消雷器和少长针消雷器两种。图(a)为多短针消雷器的头部,它是由数千个金属尖端组成的阵列,尖端靠塔体或引下线接地,其长

时间电晕电流可达0.5 mA。图(b)为少长针消雷器的头部,由5~13根长度为5 m的金属棒组成,针头30 cm处分为四叉,其长时间电晕电流可达4 mA。



消雷器的头部  
(a) 多短针; (b) 少长针

**半导体型消雷器** 利用半导体的限流作用限制上行先导的产生和发展来消灭上行雷,以及利用半导体的限流作用大幅度削弱下行雷的主放电电流使之不能造成危害,同时还兼有导体型消雷器的部分中和作用及屏蔽作用。半导体型消雷器的针体由5~13根长度为5m、电阻为35k $\Omega$ 的半导体棒组成,棒端装四分叉金属针,针座经塔体或引下线接地。

**历史及现状** 1754年当美国B.富兰克林(B. Franklin)致力于使避雷针完善发展时,捷克科学家P.迪维茨(P. Divisch)就企图用一根装有216个尖端的7.4m高的木架(尖端通过一根金属链接地)去中和雷云中的电荷。从那时起,这种想法周期性地时起时落。到20世纪70年代,消雷器才得到了长足的发展。1973年美国的R.斯奈德(R. Snyder)提出的消散阵列(一种多短针消雷器),由美国LEA公司制成,已运行数千支·年,其效果有成功与失败两方面的报导。对其主要的反对意见,是认为其电晕电流太小,不足以有效地中和雷电。而R.H.戈尔德(R. H. Golde)则认为:(由于它的前述综合效应,它可使)“雷击到高塔上的总次数大为减少”。主要反对意见也是认为:消雷器电晕放电产生的电荷远不足以中和雷云中的电荷,因而它不能阻止对地雷击放电的发生。中国1977年提出的少长针导体型消雷器和1978年提出的少长针半导体型消雷器,已分别运行约为1000支·年和300支·年。

**参考书目**

[美]戈尔德著,雷电,周诗健等译,北京:电力工业出版社,1982

(Golde R. H. Lightning. Academic Press Inc., 1977)

(陈慈莹)

xiezhen guodianya

**谐振过电压** (resonance overvoltage) 电

力系统中由于出现串联谐振而产生的过电压。电力系统中的电感有三种形式：线性电感（例如漏感）、非线性电感（铁芯励磁电感）和周期性时变电感（例如水轮发电机的电感在交、直轴电感之间作周期性变化）。当系统发生故障或进行操作时，这些电感可能与电容（例如导线电容、串联补偿电容）相串接，如果参数配合适当，将会分别产生线性谐振过电压、铁磁谐振过电压和参数谐振过电压，统称为谐振过电压。（见串联补偿系统谐振）

谐振过电压的持续时间往往较长，甚至长期存在，直至进行新的切换操作（改变电网参数）以破坏谐振条件时为止。不同性质的谐振过电压的幅值在很大范围内变动，有的可达额定电压的 3 倍以上。

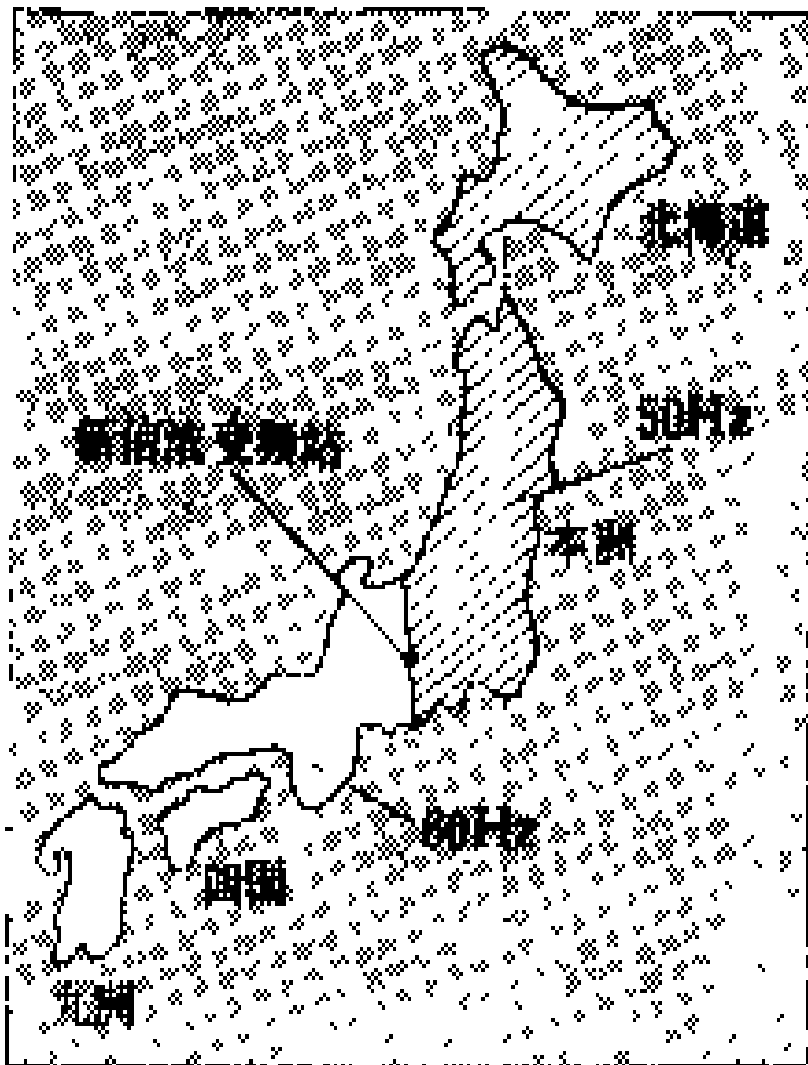
由于谐振过电压的持续性质和较高幅值，它对电气设备的绝缘构成严重威胁，通常要预先采取措施加以限制，或者一经产生谐振就立即采取对策，以限制谐振过电压的存在时间。在实际情况下，由于故障形式和谐振组合回路的多样性（特别是在 35 kV 及以下中性点不接地的电力系统中），各种类型的谐振过电压往往频繁发生，造成设备绝缘的闪络和避雷器的损坏等事故。

（陈维贤）

Xinxinnong bianpinzhan

**新信浓变频站** (Shin - shinano HVDC frequency converting station)

为将日本东部和西部额定频率分别为 50 Hz 和 60 Hz 的两个电力系统联成一个统一电网，东京电力公司在日本本洲中部岗谷市附近建设了一个高压直流的非同步耦合系统，以当地地名命名为新信浓变频站。它是目前世界上第一个用晶闸管阀装备的 50/60 Hz 变频站，也是当今容量最大的变频站。地理位置如图所示。其主要目的是为了两个电力系统



新信浓变频站地理位置图

系统可获得联网效益，共同经济合理地承担峰荷时热备用，事故时的相互支援，正常运行时电能的经济交换。

第一期工程有两极，每极有一组六脉动换流桥，额定值均为电压 125 kV，电流 1200 A，输送容量 300 MW。

计划第二期再上相同容量的两极，形成总容量为

600 MW 的变频站。主要设备参数见表。50Hz 和 60Hz 侧设备分别由东芝公司和日立公司制造。交流谐波滤波器则由日新公司承造。

新信浓变频站主要设备参数表

设备名称		额定参数
换流变压器		50Hz: 3 相, 275/110kV, 187MV·A
		60Hz: 3 相, 275/110kV, 187MV·A *
晶闸管阀		50Hz: 125kV, 1200A
		60Hz: 125kV, 1200A
平波电抗器		125kV, 1200A, 1±0.2H
交流谐波滤波器		50Hz: 5、11、13 次及高通, 滤波容量 72 Mvar
		60Hz: 5、11、13 次及高通, 滤波容量 60 Mvar
无功功率补偿装置	并联电容器	50 Hz: 66 kV, 40 Mvar
	并联电抗器	60Hz: 22kV, 40 Mvar
		60 Hz: 20 kV, 30 Mvar

该工程的主要特点是采用了户外式油浸密封箱形结构的晶闸管阀。它可以防尘，不因大气污染而受损害。此外，因重心低，还具有很好的抗地震性能，这是符合日本当地情况的。但这种结构给检修、更换元件带来困难。为此在 60Hz 及 50Hz 两侧均设有一台备用阀。

参见彩图插页第 40 页 121 图。

（郑德明）

xingbo

**行波** (traveling wave) 以波速  $v$  沿导线移动的电磁波，也称流动波。行波沿导线向给定的  $x$  正方向移动时称为前行波，向  $x$  负方向移动时称为反行波。用流动波图案来描述分布参数电路的过渡过程时，需把导线上的电压和电流分解为一系列的前行波和反行波。前行电压波  $u_1$  和前行电流波  $i_1$  可表示为

$$u_1 = u(x - vt) \text{ 或 } u\left(t - \frac{x}{v}\right)$$
$$i_1 = i(x - vt) \text{ 或 } i\left(t - \frac{x}{v}\right)$$

$u_1$  和  $i_1$  是互相伴随着出现的，它们之间的关系由波阻抗  $Z$  决定，即

$$u_1 = Zi_1$$

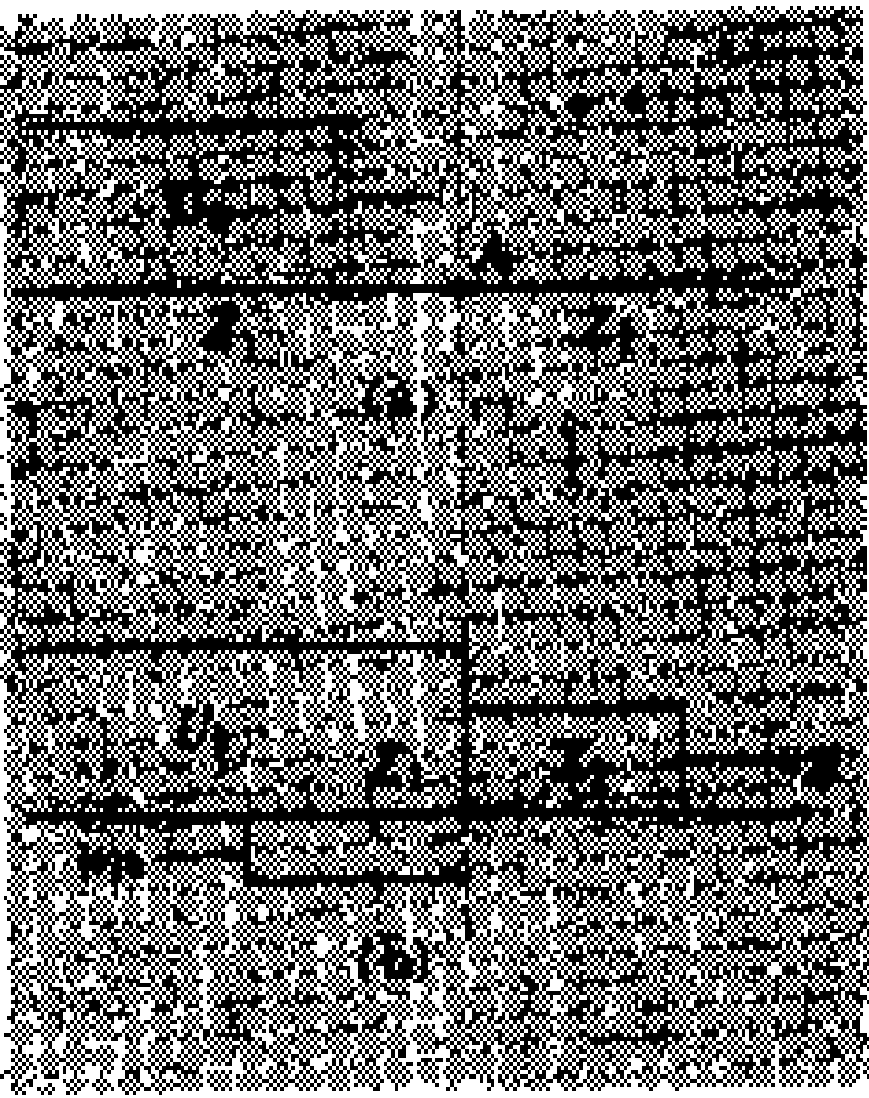
反行电压波  $u_b$  和反行电流波  $i_b$  可表示为

$$u_b = u(x + vt) \text{ 或 } u\left(t + \frac{x}{v}\right)$$
$$i_b = -i(x + vt) \text{ 或 } -i\left(t + \frac{x}{v}\right)$$

$u_b$  和  $i_b$  也是互相伴随着出现的,它们之间的关系也由波阻抗  $Z$  决定,即

$$u_b = -Zi_b$$

行波在沿导线的行进过程中遇到导线参数改变时,入射波中的电磁场能量将不能全部向前传递,故在导线结点处将发生电磁能量的折射和反射,从而引起波折射和波反射。波折射将形成新的继续沿着行波行进方向传播的折射波;波反射将形成逆着行波行进方向传播的反射波。在图示的波阻抗为  $Z_1$  及  $Z_2$  两线路串联的电路中,当电压波  $U_0$  沿波阻抗为  $Z_1$  的线路向前传播时,在结点 A 处出现的折射波  $u_{21}$  和反射波  $u_{1b}$  可按下式求出



波的折射和反射 ( $Z_2 < Z_1$ )  
(a)  $U_0$  到达 A 点以前;  
(b)  $U_0$  到达 A 点以后

$$u_{21} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_0 = \alpha U_0$$
$$u_{1b} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_0 = \beta U_0$$

式中  $\alpha$  称为折射系数; $\beta$  称为反射系数。折射系数和反射系数间的关系为  $1 + \beta = \alpha$ 。

(陈慈荃)

xudionchi

**蓄电池** (storage battery) 一种具有可逆的电-化学能量转换功能并能进行充电、放电多次循环使用的直流电源设备。充电时,蓄电池将电能转变成化学能储存起来;放电时,将所储存的化学能转变成直流电能释放出来。变电所中通常按照直流系统的电压,将多个单体蓄电池串连成蓄电池组使用。由于蓄电池能不间断地供给直流用电,而不受交流侧事故停电的影响,是变电所中独立的直流电源系统。蓄电池一般分为酸性和碱性两大类,变电所中采用的有固定型铅酸蓄电池、镉镍碱性蓄电池或铁镍碱性蓄电池。

铅酸蓄电池

固定型铅酸蓄电池分为开口式、防酸式和防酸防爆式,后两种采用封闭式容器,其结构和特性基本类似。

**构造** 主要由正负极板组、电解液和容器组成。多半采用的正极板为玻璃丝管式结构,负极板为涂膏式结构。正极板的有效物质为褐色的二氧化铅 ( $PbO_2$ ),

负极板的有效物质为灰色的铅绒 ( $Pb$ )。如图 1 所示,极板利用上部的耳柄挂在容器的两侧边缘,极板之间用耐酸的塑料纤维或木质绝缘材料做的多孔性隔板隔开。负极板比正极板多一块,使正极板两面均匀作用,以免极板弯曲。旧式容器为开口式玻璃缸,新式的为封闭的防酸防爆式透明塑料缸。电解液是由纯硫酸 ( $H_2SO_4$ ) 和蒸馏水稀释成比重为 1.21 (温度为 15℃ 时) 的溶液。

**工作原理** 在蓄电池容器中注入电解液后,正、负

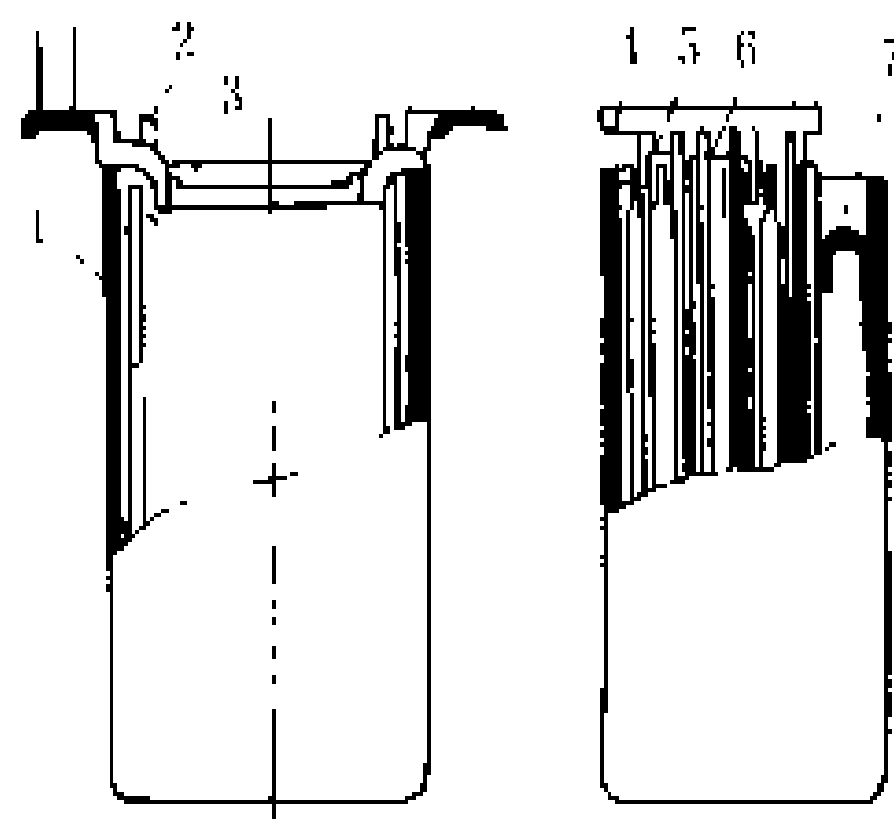


图 1 玻璃丝管固定式铅酸蓄电池

1—玻璃(或塑料)容器;2—木撑;3—隔板(隔条);4—连接板;5—正极板;6—负极板;7—铅弹簧

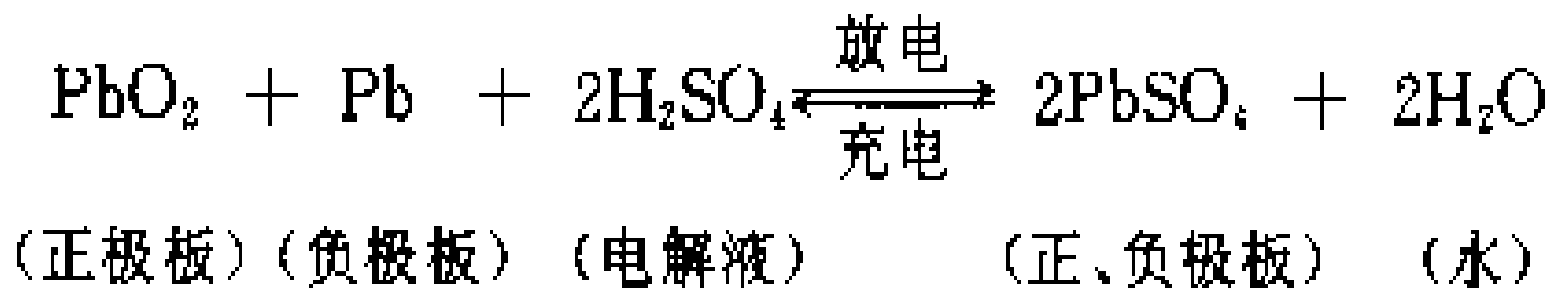
极板上便产生不同的电位,在外电路断开时,正、负极板间的电位差即为蓄电池的电动势。

放电时,电流由正极板经外电路荷载流向负板板,在蓄电池内则从负极板流向正极板,使电解液硫酸分解为正离子氢 ( $H_3^{+}$ ) 在正极板上析出,

负离子硫酸根 ( $SO_4^{2-}$ ) 在负极板上析出。在两极极板上生成硫酸铅 ( $PbSO_4$ ),同时析出水,使电解液比重减少。

充电时,外部直流电源的端电压高于蓄电池(组)的反电动势和内阻压降之和时,将产生充电电流,在蓄电池内电流从正板板流向负极板。电解液被分解为正离子氢 ( $H_3^{+}$ ) 在负板板上析出,负离子硫酸根 ( $SO_4^{2-}$ ) 在正极板上析出。充电完成后,两个极板上恢复为原来的有效物质 ( $PbO_2$ 、 $Pb$ ),同时电解液比重增加。铅酸蓄电池充电是放电的逆过程。

充、放电时蓄电池的电化学反应式为



**特性** 主要包括电动势、端电压、容量和自放电等特性。

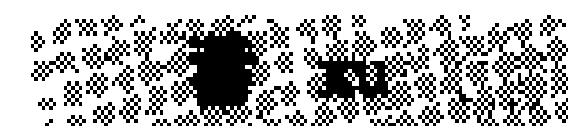
**电动势** 铅酸蓄电池的电动势大小主要与电解液的比重有关,而与极板的面积大小无关,受温度的影响可忽略不计。一般用下列经验公式表示电动势  $E$ ,即

$$E = 0.85 + d$$

式中  $d$  为电解液在 15℃ 时的比重,充电后  $d$  为 1.21,全部放电后约为 1.15。静止时单体铅酸蓄电池的电动势约为 2.00~2.06V。

**端电压** 在放电或充电过程中,蓄电池的端电压





( $U$ ) 都是变化的,它与电动势  $E$  (或电解液的比重  $d$ )、内阻  $r$ 、充电电流  $I_c$  和放电电流  $I_d$  有关,即  $U=E-I_d \cdot r$  或  $U=E+I_c \cdot r$ 。其变化过程大致可分为三个阶段 (见图 2): ①初始时端电压变化较快,主要是由于极板表面附近和有效物质微孔内硫酸的浓度(或比重)的剧烈变化,充电时剧增,放电时锐减,来不及与容器内比重不同的电解液之间互相扩散。②中期端电压变化较缓慢,这是由于电解液内的扩散作用使微孔内的硫酸保持一定的浓度。③后期端电压的变化继续保持较快,原因是充电末期正、负极板被析出的氧和氢的气体提高了正极的电位和负极的内阻;放电末期极板的有效物质大部分已形成了硫酸铅,阻塞了有效物质微孔的入口,使电化学反应难以进行,因而电动势下降,极板内阻加大,端电压下降。充电末期单体蓄电池的端电压稳定在 2.7 V 左右,停止充电时立即骤降至 2.3 V 而后稳定在 2.06 V 左右;放电末期单体蓄电池的端电压不应低于 1.8 V,停止放电时端电压将回升至 2 V 左右。

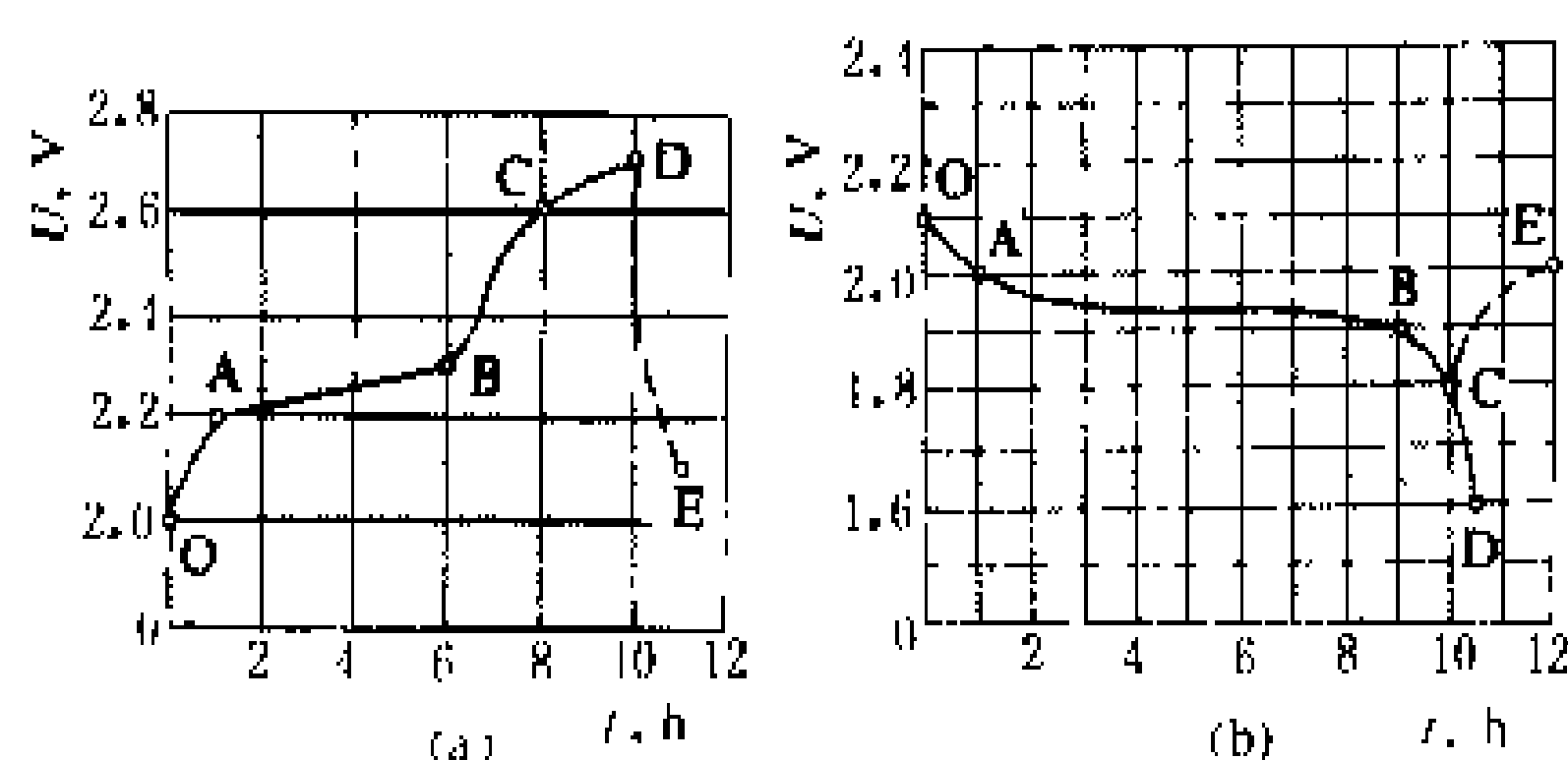


图 2 铅酸蓄电池充、放电压曲线  
(a) 充电; (b) 放电

**容量** 铅酸蓄电池在充足电后放电至终止电压时所能放出的电量。通常以 10 h 放电率的放电容量称作铅酸蓄电池的额定容量。蓄电池的容量与其极板的面积、数量以及电解液的比重、体积有关,而在使用中更主要的是与其放电率(放电电流和时间)、充电程度、环境温度等因素有关。

**自放电** 蓄电池由于其自身的内阻而进行的放电。自放电会使蓄电池自行失去电量。自放电有两种形式: ①由于电解液所含的金属杂质沉积在负极板上以及极板的有效物质本身含有金属杂质,使负极板形成局部短路的小电池; ②电解液上下间比重不同,引起极板上下的电动势不同,因而在正、负极板上下之间产生均压电流。为防止因自放电而使极板硫化,要对蓄电池定期进行均衡充电来予以补偿。

**运行方式** 有充电-放电运行方式和浮充电运行方式两种。

**充电-放电运行方式** 将充好电的蓄电池向直流负荷供电,待放电至规定电压值后再进行充电的一种

运行方式。为了保证在变电所发生事故情况下蓄电池组能可靠地工作,通常规定在放电容量达 60%~70%,单体蓄电池的端电压为 1.95 V 时即停止放电。重要变电所一般设有两组蓄电池,充电期间直流负荷由已充好电的另一组蓄电池供电。一般变电所仅设一组蓄电池,充电装置除向蓄电池组充电外,还兼供直流负荷。

单体蓄电池的端电压在充放电过程中的变化范围为 1.95~2.7 V,为了保持直流系统母线工作电压的恒定,一般设有端电池和端电池调整器。端电池调整器的放电手柄用来调整直流母线的工作电压,充电手柄用来在充电时将已充好电的端电池提前退出充电。两个手柄分别带动两个可动触头,其结构相同,可动触头的主、辅触头保证在操作过程中维持电路接通,主、辅触头之间串接附加电阻,防止两个触头短暂间跨接在相邻两个固定金属片上而将被跨接的蓄电池短接。充电前,移动充电手柄使全部蓄电池接入充电回路,调高充电装置的输出电压,投入充电装置使之与蓄电池并联,充电装置即开始充电并承担直流母线上的经常负荷。充电过程中,随着每个单体蓄电池端电压的升高,要相应地调高充电电压来保持恒定的充电电流,同时移动放电手柄来减少接入母线的端电池数目,以保持母线工作电压不变。充电终止时,端电池全部退出。蓄电池组在给直流负荷供电的过程中,端电压逐渐降低,可用放电手柄逐渐将端电池接入电路,以保持直流母线的工作电压。

**浮充电运行方式** 将蓄电池组与浮充电装置并联,由浮充电装置向直流母线供电同时又以小电流向蓄电池组浮充电的一种运行方式。重要变电所除了主充电装置外,还另设一台容量较小的浮充电装置。一般变电所通常用一台充电装置兼作浮充电用。

当交流系统或浮充电装置发生事故时,蓄电池组转入放电状态运行,承担全部直流负荷的供电任务。一旦事故消除,即对蓄电池组充电,并转到正常的浮充电状态运行。为了在事故情况下蓄电池组仍能保持直流母线工作电压不变,也需采用端电池调整方式。

浮充电时,每个单体蓄电池的端电压约为 2.15 V,因此,需要将部分端电池退出,以保持直流母线工作电压为规定值。这些端电池不流过充电电流,经常处于自放电状态,为避免极板硫化必须定期进行充电。

按浮充电方式运行时,一般要求对蓄电池组每三个月进行一次核对性放电,即放电至规定值 1.95 V (约 50%~60%容量)或以 10 h 放电率进行全容量放电至单体蓄电池的终止电压 1.75~1.80 V。放电完后即进行均衡充电(或称过充电)。

采用浮充电运行方式的蓄电池组,由于自放电而

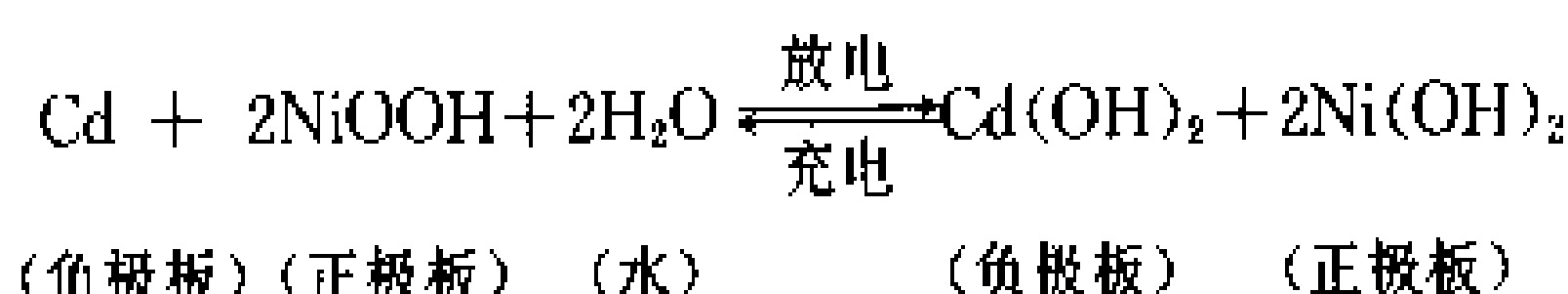
消耗的电量得以补偿,因而它经常处于充满电状态。蓄电池的容量得到充分利用,直流母线电压稳定,不需要经常充放电,使蓄电池的寿命延长,简化了维护和运行工作,因而在变电所中得到广泛的采用。

## 碱性蓄电池

**构造** 碱性蓄电池按极板的结构工艺不同,有袋式、涂膏式和烧结式三种。烧结式极板又分为全烧结式和半烧结式,半烧结式的正极板采用烧结工艺,负极板采用涂膏式工艺。镉镍和铁镍蓄电池的负极板的有效物质分别为海绵状的镉(Cd)和铁(Fe),正极板的有效物质均为羟基氧化镍(NiOOH)。容器由金属或塑料制成。电解液为比重1.18~1.28的氢氧化钾(KOH)溶液,为了提高蓄电池容量和使用寿命,通常在电解液中加入少量的氢氧化锂(LiOH)。

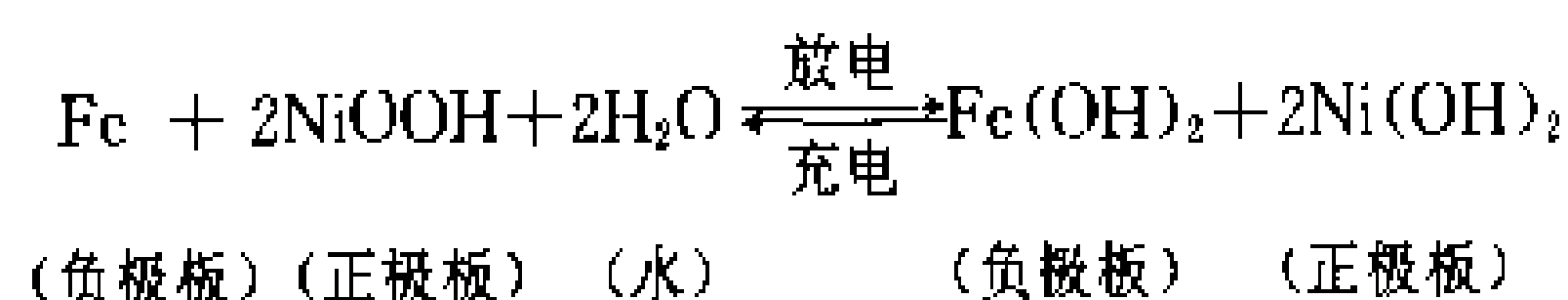
**工作原理** 在注入电解液后,正、负极板上便产生不同的电位,在外电路断开时的电位差即为蓄电池的电动势。以镉镍蓄电池为例,放电时,在蓄电池电动势的作用下,电路内产生电流,由正极板经外电路的负荷流向负极板,在蓄电池内则从负极板流向正极板,使氢氧化钾电解液分解为正离子钾(K<sup>+</sup>)在正极板上析出,负离子氢氧根(OH<sup>-</sup>)在负极板上析出,在正、负极板上分别生成氢氧化镍[Ni(OH)<sub>2</sub>]和氢氧化镉[Cd(OH)<sub>2</sub>]。充电时,当外接直流电源的端电压高于蓄电池的反电动势和内阻压降之和时,将产生充电电流,在蓄电池内充电电流从正极板流向负极板。氢氧化钾电解液分解为正离子钾在负极板上析出,负离子氢氧根在正极板上析出。充电完成后,两个极板上恢复为原来的有效物质NiOOH和Cd。

充、放电时镉镍碱性蓄电池的电化学反应式为



镉镍蓄电池的电化学反应是可逆的,在充放电过程中不消耗电解液,其比重几乎无变化,但有吸附和释放水的特性。放电时电极吸收水而使电解液的液面下降,充电时电极释放水而使电解液的液面升高。

铁镍蓄电池的充放电电化学反应式与镉镍蓄电池的完全类似,即



**特性** 主要包括电动势、端电压、容量和自放电等特性。

**电动势** 同一种体系的碱性蓄电池的电动势相同,它与极板有效物质的组成和氧化程度有关,而与极

板面积的大小和电解液的比重无关。电动势为正板板与负极板的标准电位之差,如镍的标准电位为+0.52 V,镉的标准电位为-0.809 V,则镉镍单体蓄电池的电动势为1.33 V。

**端电压** 单体碱性蓄电池的充、放电终止电压与充、放电电流的大小有关。5 h 充电率时的充电终止电压为1.55~1.60 V,10 h 充电率时为1.50~1.55 V。用低倍率放电时,放电终止电压一般为1.0 V。如放电倍率很高,放电终止电压可能稍低些(0.7~0.9 V)。图3为镉镍碱性蓄电池充、放电时端电压随时间的变化曲线。

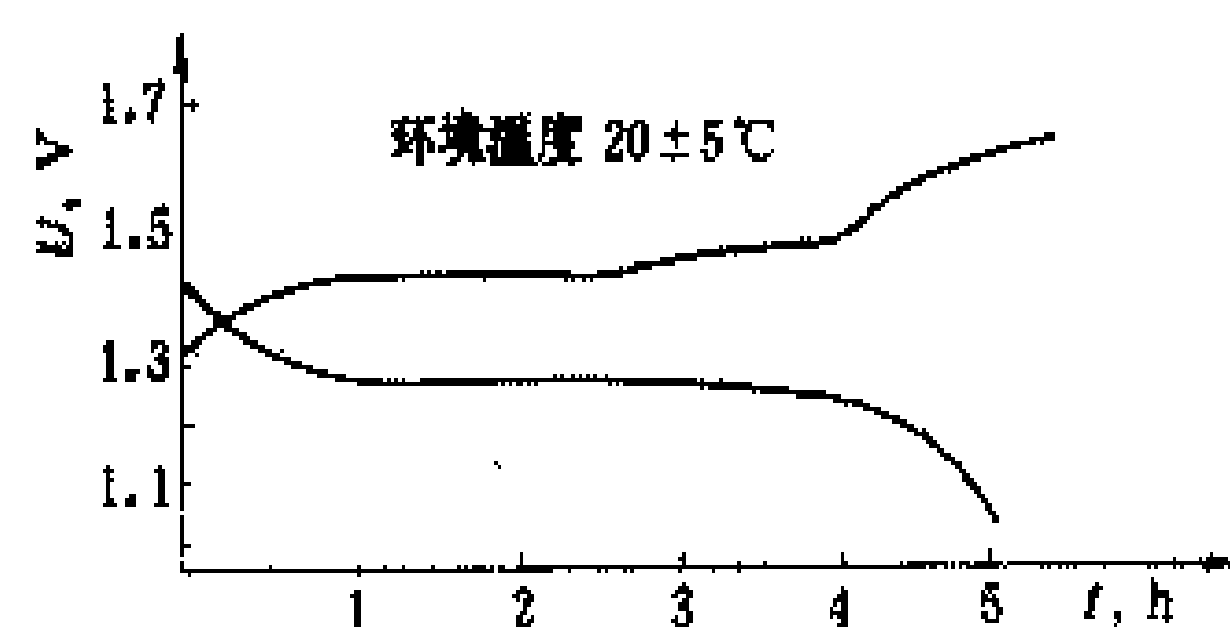


图3 镉镍蓄电池充放电电压曲线

**容量** 碱性蓄电池在充足电后至终止电压1.0 V时所能放出的电量。通常镉镍蓄电池以5 h 放电率或铁镍蓄电池以8 h 放电率的放电容量称作额定容量。

**自放电** 碱性蓄电池的自放电有两种形式:①充电时,正极板上还同时形成二氧化镍(NiO<sub>2</sub>),充电完毕后它会迅速地分解,使蓄电池电动势减少;②负极板上的有效物质与电解液相互作用而形成氢氧化镉[Cd(OH)<sub>2</sub>]或氢氧化亚铁[Fe(OH)<sub>2</sub>]。自放电在注入电解液的最初几天内最强,到第一个月末,可能失去15%~35%的容量。当电解液的温度高于25℃时,会加剧自放电现象,高于40℃时会永远地失去一大半容量。

**运行方式** 同铅酸蓄电池相类似,也有充电-放电运行方式和浮充电运行方式两种。

碱性蓄电池的充电方法有:①恒流充电,用计算充电时间来控制充电程度;②恒压充电,充电电流开始很大,随着充电时间而逐渐变小,最终趋于零,充电时间不严格控制;③限流恒压充电,先为恒流充电,后改为恒压充电。

碱性蓄电池的浮充电一般采用恒压充电法,单体碱性蓄电池的浮充电电压控制在1.36~1.45 V,低于要求值时会使蓄电池容量不足或缩短使用寿命。但由于浮充电电压受环境温度影响,故用控制浮充电流方法较好,可保证蓄电池处于满容量状态。

长期处于浮充状态的碱性蓄电池,会使电池容量不足和单体电池之间容量不均。通常用0.1倍额定容量的电流值放电1~2次,使电池活化,恢复到一定容量。

## 应用和发展

在中国大多数变电所中仍以铅酸蓄电池为主,作为控制、保护、自动装置、信号、事故照明等负荷的直流电源。铅酸蓄电池在机械强度、使用寿命、体积、低温性能、对环境保护和运行维护的方便等方面都不及碱性蓄电池,而且还需要设专门的蓄电池室。

20世纪50年代,中国建成第一个碱性蓄电池厂。近10年来,中国的镉镍蓄电池及其直流系统成套装置的制造技术,有了很大的发展。镉镍蓄电池的直流系统成套装置集中安装在2~3个屏(柜)内,实现了直流系统的小型化和一体化,不仅在中小型发电厂和110 kV及以下的变电所中推广使用,而且在较大容量的发电厂和220 kV变电所中也有试点,并有继续扩大应用范围的趋势。

(徐国柱 孙家福)

xuanshi jueyuanzi

### 悬式绝缘子 (suspension - type insulator)

以悬垂或耐张方式固定带电导体或设备的一种绝缘子。按其外形不同,可分为盘形悬式绝缘子和棒形悬式绝缘子两大类。其绝缘本体由电工陶瓷、钢化玻璃或合成材料构成,通常适宜于承受拉力。

盘形悬式绝缘子 由盘形绝缘件和连接金具组成的悬式绝缘子。其绝缘件通常用电工陶瓷或钢化玻璃制成。金具一般由钢帽和针形钢脚构成,钢帽和钢脚形成两个电极,绝缘件介于其间,故盘形悬式绝缘子又称针-帽型悬式绝缘子。金具与绝缘件之间,用高强度水泥或其他粘合剂胶装成一个整体。为减少连接金具、绝缘件以及粘合剂等不同材料在冷热变化时产生的应力,在材料的结合面上常涂以缓冲层。盘形悬式绝缘子的主要结构尺寸是高度和伞盘直径(见图1),通常所谓的标准盘形悬式绝缘子的高度为146 mm,伞盘直径为254 mm。

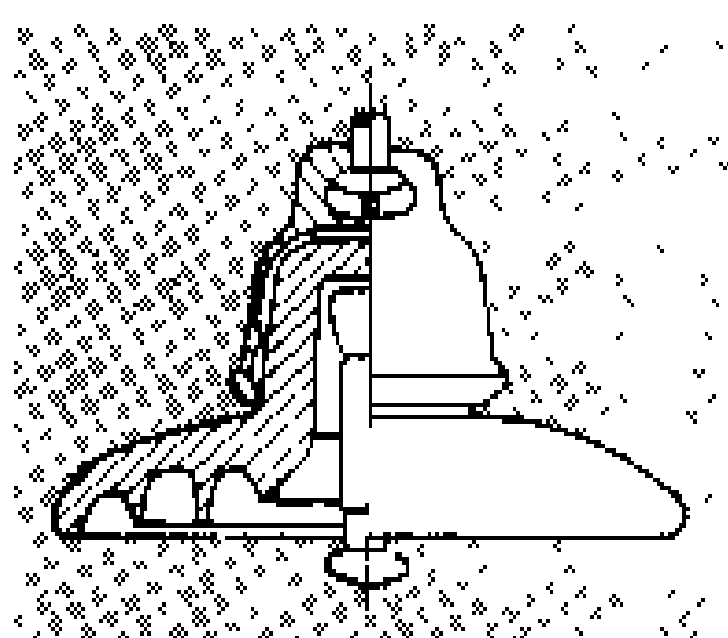


图1 盘形悬式绝缘子

盘形悬式绝缘子的关键部位是它的头部,即处于钢脚与钢帽之间的绝缘件,在运行中它所承受的机械应力和电场强度最大。头部有圆柱形和圆锥形两种结构。圆柱形头部结构表面在制造过程中用特殊工艺粘上一层瓷砂或玻璃砂,以便和粘合剂形成一个整体。圆柱形结构的头部尺寸比较紧凑,但工艺较复杂。圆锥形头部结构的内外表面是光滑的,胶装以后,靠倒锥形结构传递机械荷载,瓷与胶装水泥之间允许产生相对滑动。盘形悬式绝缘子的伞盘部分基本上不承受机械

荷载,它的外形尺寸主要由电气性能的要求来决定。为提高沿伞盘表面的放电电压,伞盘下面通常有较多的棱。

盘形悬式绝缘子实际上很少单片使用,大多用以组成绝缘子串。为承受较大的机械荷载,可用二串甚至多串绝缘子串并联。绝缘子串的连接金具有球窝型和槽型两种,连接处用弹簧销卡住以防滑脱。

盘形悬式绝缘子在运行中主要承受拉力荷载。由于电极间绝缘件的厚度远小于沿表面的爬电距离,因此它属于可击穿类绝缘子。一旦发生绝缘件击穿,不仅永久丧失绝缘性能,而且也会导致机械性能的降低或丧失;反之,绝缘件如发生机械破坏,电气绝缘性能也会降低或丧失。通常用机电瞬时破坏强度来表征盘形悬式绝缘子在机械和电应力联合作用下承受机械荷载的能力。例如中国生产的XP-300(30.6)型绝缘子,其瞬时机电破坏强度为300 kN(30.6 t),即瞬时破坏拉力不低于300 kN。当盘形悬式绝缘子发生机械破坏或电击穿以后,绝缘子的钢帽和钢脚之间尚能承受一定的机械拉力,称为绝缘子头部的残锤强度。如残锤强度高于实际荷载,则不会发生绝缘子串断裂掉线事故。通常称丧失绝缘性能的绝缘子为零值绝缘子,运行中可用测量绝缘子串电位分布的方法来发现零值绝缘子。玻璃绝缘子在电击穿以后,由于内应力的作用,绝缘件会自行破裂成碎块,有助于从外观上鉴别出零值绝缘子,这是玻璃绝缘子的一大优点。

盘形悬式绝缘子的试验项目有:检验其电气性能的雷电全波冲击耐受电压试验,工频干、湿耐受电压试验,人工污秽闪络电压试验和工频电压油中击穿试验等;检验其机械性能的机械破坏荷载试验、打击负荷试验等;考验其耐受冷热变化能力的温度循环试验、玻璃绝缘子热震试验等。

棒形悬式绝缘子 由长圆柱棒形实心的绝缘件和两端的帽形连接金具组成的悬式绝缘子。其绝缘件一般由电工陶瓷或合成绝缘材料制成。金具和绝缘件之间用高强度水泥或其他粘合剂胶结成一个整体。由于绝缘件两端金具间的距离很大,绝缘件的击穿电压远高于沿表面的闪络电压,故它属于不可击穿类的绝缘子(见图2)。为提高沿绝缘件表面的闪络电压,棒形绝缘件表面设有伞(裙)或棱,其形状取决于使用条件。使用于污秽地区时,伞(裙)和棱比较多。绝缘件在运行中承受拉应力,如发生断裂,绝缘子将完全丧失机械性能,导致掉线事故。棒形悬式绝缘子可以单个使用,亦可多个串接使用。

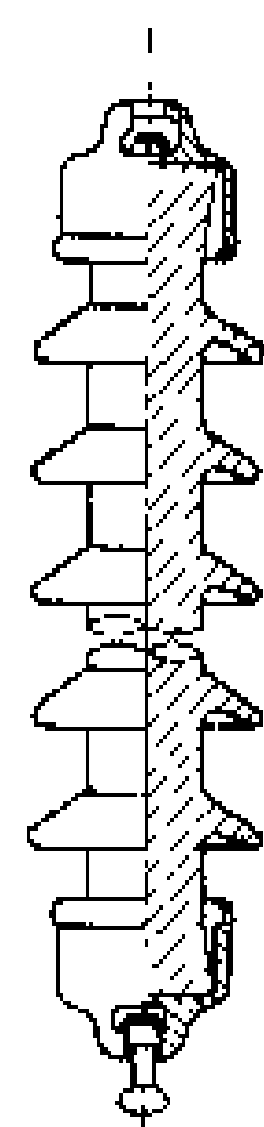
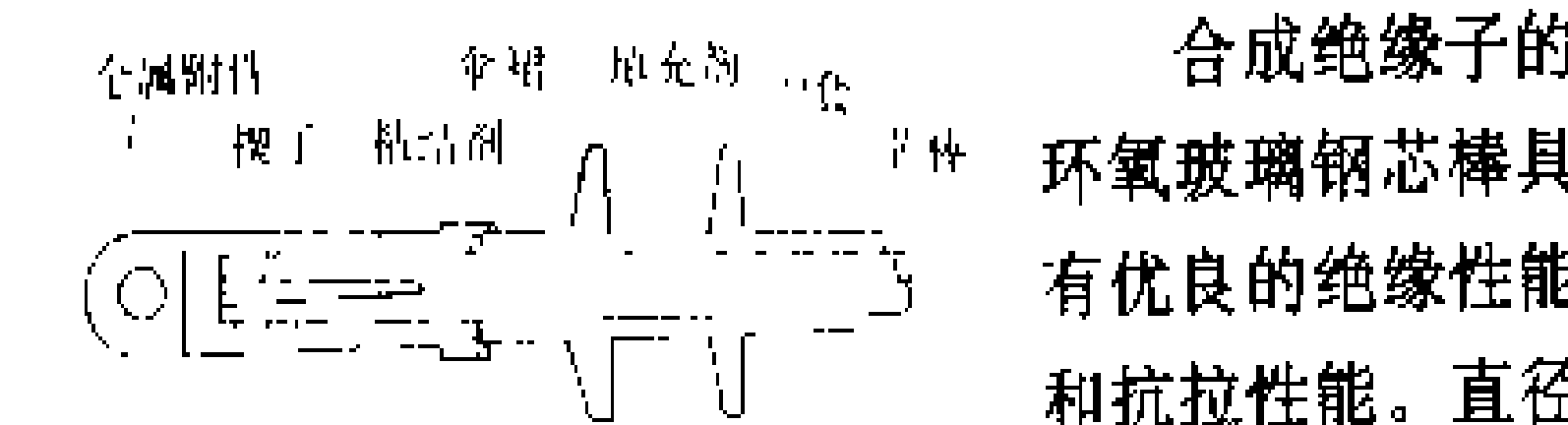


图2 棒形悬式绝缘子

棒形悬式绝缘子的试验项目有：工频干、湿耐受电压试验，全波冲击耐受电压试验，人工污秽闪络电压试验，机械拉伸荷载试验和温度循环试验等。

合成绝缘子 以合成材料制成绝缘件的棒形悬式绝缘子。其绝缘件是由承受拉力的环氧玻璃钢芯棒与用硅橡胶或乙丙橡胶一类材料制成的护套及伞(裙)构成。护套和伞(裙)用粘合剂与芯棒粘结成一个整体，芯棒以楔形结构或用粘合剂与两端的连接金具连成整体(见图3)。



即可承受约490 kN的拉力。硅橡胶等憎水材料制成的伞(裙)和护套，使合成绝缘子具有良好的抗污秽闪络性能。与瓷或玻璃的绝缘子相比，合成绝缘子的单位爬电距离的闪络电压可大幅度提高。合成绝缘子的重量很轻，仅为同电压等级瓷绝缘子串重量的1/8左右，便于运行维护和运输。由于一部分材料是有机材料，其抗老化性能则不如瓷或玻璃的绝缘子。

合成绝缘子常应用于超高压架空输电线路，特别是污秽比较严重而增加爬电距离又受到限制时，如电气化铁道、升压线路和重污秽地区。此外，也可用于新型杆塔(如悬索塔、紧凑型塔)的输电线路。

(郑健超)

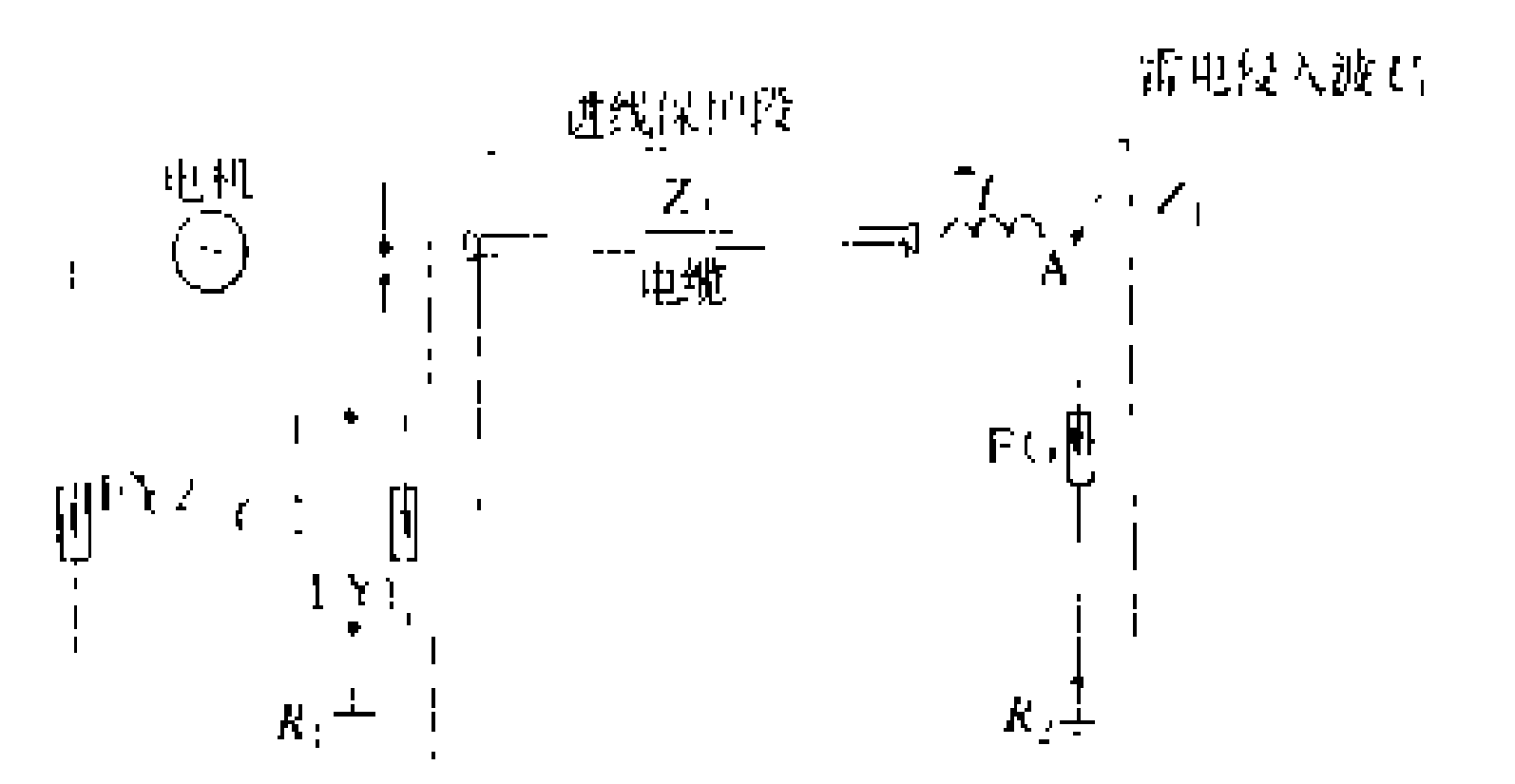
xuanzhuan dianji fanglei

**旋转电机防雷** (lightning protection of rotating electric machine) 为保证旋转电机正常运行防止雷害的安全措施。旋转电机包括发电机、同步调相机、变频机和电动机等。旋转电机防雷的主要困难是电机的冲击绝缘水平很低，只相当于同一电压等级变压器冲击绝缘水平的1/3左右。而且大电机一般是系统的关键元件，发生雷害时，可能引起强大的工频短路电流，将烧坏电机的绝缘和铁芯，修复比较困难，会造成长时间大面积的停电。因此旋转电机的防雷要求有较高的可靠性。

旋转电机防雷保护的主要元件有避雷针、避雷线、避雷器、电容器、电抗器、进线保护段(如电缆段或利用避雷针、避雷线保护的架空线路段)以及相应的接地装置等。旋转电机的直击雷防护采用避雷针或避雷线，感应雷防护采用电容器或金属氧化物避雷器。

旋转电机的防雷接线按电机和架空线路的连接方式的不同分为直配电机的防雷保护和非直配电机的防雷保护两类。

直配电机的防雷保护 直配电机指以发电机电压直接和架空线相连的电机，它的保护接线根据电机容量、雷电活动的强弱程度和对供电可靠性的要求有所不同。图示为用于单机容量在6000 kW以上直配电机防雷保护的典型接线。



直配电机防雷保护的典型接线

图中安装在电机母线上的金属氧化物避雷器FY1用来限制电机母线上的雷电压幅值，避雷器的额定电压不能低于电机最高运行线电压的1.2倍。安装在电机中性点的金属氧化物避雷器FY2用来保护电机中性点的绝缘，其额定电压不能低于电机最高运行相电压。

安装在电机母线上的电容器C用来降低沿架空线侵入的侵入波陡度，同时也保护电机的匝间绝缘和防止感应雷过电压，其电容量为0.25~0.5 μF，对于中性点不能引出或双排并绕绕组的电机则取1.5~2 μF。

进线保护段由电缆、电抗器L和管式避雷器FG组成，用来限制流经电机母线上避雷器FY1的雷电流，从而降低其残压。电缆首端电抗器L为100~200 μH，其作用是抬高电抗器前面A点的冲击电压，从而使管式避雷器FG容易放电。管式避雷器击穿可使电缆的外皮和芯线短接，强烈的集肤效应会使雷电流沿电缆外皮向左流，从而降低了电缆芯线流向避雷器的雷电流。为充分利用电缆金属外皮的散流作用，减少电缆末端接地引下线的雷电流压降，可将电缆的铅包全长或一段直接埋入地中，或将电缆金属外皮多点接地(除两端接地外，再在两端中间的3~5处接地)。电缆长度一般在100~150 m以上。对单机容量在1500~6000 kW的直配电机，也可不用电缆，只设300 μH的防雷电抗器。

直配电机的防雷也可用防雷变压器来实现。防雷变压器即变比为1:1的绝缘变压器，只用来隔断直配电机与架空线路的直接联系，并不起变换电压的作用。

非直配电机的防雷保护 非直配电机指无发电机电压的架空直配线，经升压变压器与架空线路连接的旋转电机。非直配电机一般只需在变压器线路侧做好防雷保护。在多雷区，经升压变压器送电的特别重要的

发电机，则要在电机出线上装设一组金属氧化物避雷器。如与该避雷器并联一组保护电容器（电容量为  $0.25\sim 0.5\ \mu\text{F}$ ），并在电机中性点上装设一只额定电压和电机最高相电压相应的避雷器，则电机就非常安全了。

经升压变压器送电的发电机，如发电机至升压变

压器之间有较长（大于  $50\ \text{m}$ ）的架空母线桥或软连线时，除防直击雷外，还要防止感应雷。通常是在电机出线上每相装设不小于  $0.15\ \mu\text{F}$  的电容器、金属氧化物避雷器或磁吹避雷器。在电机中性点上装设避雷器，对限制感应雷过电压也有一定的作用。

（许 颖）

# Y

yoqi (SF<sub>6</sub>) jueyuan dianlan

**压气(SF<sub>6</sub>)绝缘电缆** (compressed gas insulated cable, GIC) 用压缩的 SF<sub>6</sub> 气体作为绝缘介质的电力电缆, 简称六氟化硫电缆。

压气 (SF<sub>6</sub>) 绝缘电缆是 20 世纪 70 年代初期发展起来的。它的主要特点是介质损耗因数小, 电容小, 结构简单, 绝缘不受温度的影响, 允许使用大截面的导体, 具有良好的散热性能, 不需要复杂的中间接头, 且敷设路径不受水平高差的限制, 因此特别适用于超高压大功率高落差和防火要求高的电力电缆线路。六氟化硫电缆的结构与气体绝缘金属封闭电器的母线很相似, 有单芯的也有三芯的。导体由铜管或铝管制成, 用环氧树脂或瓷的支撑板固定在钢或合金铝制的保护管中。管长一般为 12~14 m, 通过电气和气密试验后充以 0.04 MPa 氮气并加以密封, 以便随时运往现场进行连接。每百米左右为一个充气单元, 运行时气体压力一般选为 0.35~0.5 MPa, 每个单元有一个压力监视装置。管道每隔一定距离设有一个伸缩接头。

SF<sub>6</sub> 气体是一种无色、无味、无嗅、无毒、不燃的惰性气体, 在 150℃ 以下化学性能十分稳定, 不会给人体和设备造成损害。但若 SF<sub>6</sub> 气体不纯或在运行中由于电晕或故障时的电弧作用产生分解物时, 就可能有剧毒。为了保证安全, 在检修六氟化硫电缆时, 需采取严密防护措施, 除对管道强迫通风以彻底排除管内残留气体外, 要求检修人员必须戴防毒面具和防护手套。

参见彩图插页第 31 页 96 图。

## 参考书目

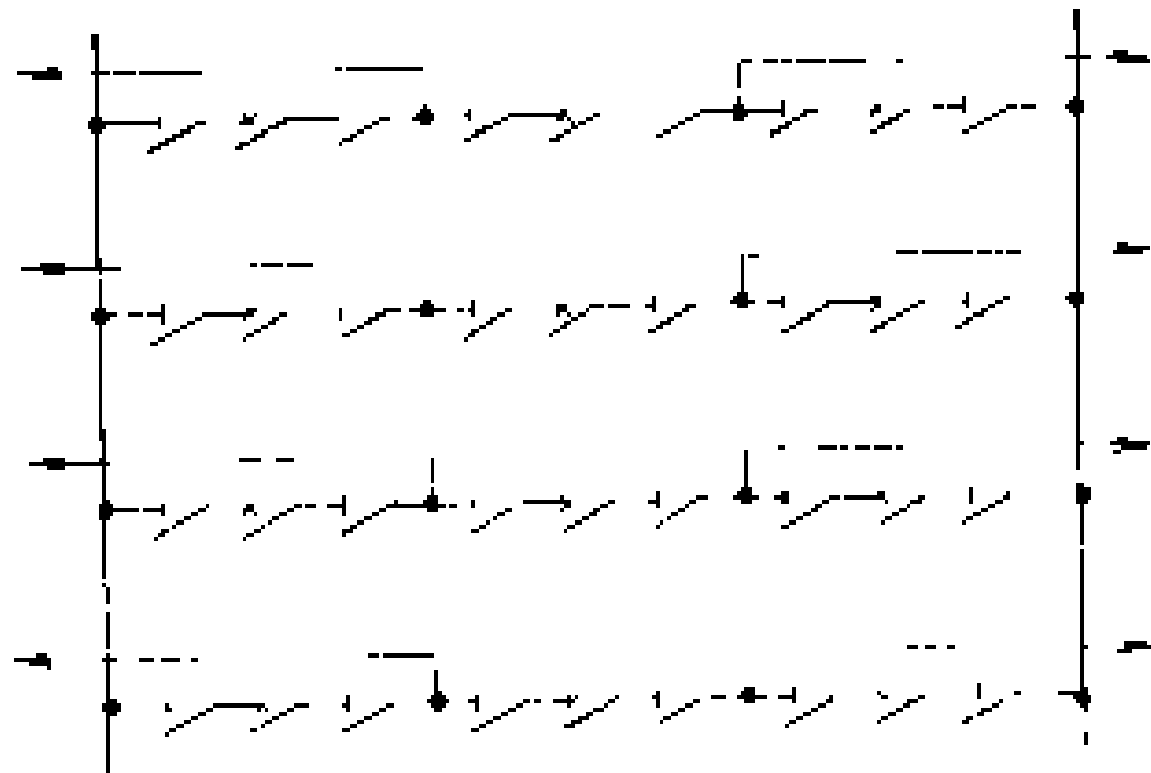
Grancu P. Underground Power Transmission. New York: John Wiley & Sons, 1979  
飯塚喜八郎, 電力ケーブル技術ハンドブック, 東京: 株式会社電気書院, 1974

(郑肇骥)

yigeban duanluqi jiejian

**一个半断路器接线** (breaker and a - half configuration) 两个引出回路通过二台串接断路器 (称作一串) 分别接到两组主母线上的电气主接

线。在此接线中, 每台断路器的两侧均装设一组隔离开关, 供检修断路器时隔离之用。在一些变电所和发电厂中在每条引出回路上设置一组隔离开关, 当该回路停止运行时, 可以断开此隔离开关, 以保持该串能继续运行, 见图。



一个半断路器接线

一个半断路器接线的特点是: ①可靠性高。任何一台电气设备或一组主母线故障都不会造成全部配电装置的停电。当一台断路器检修, 另一回线路或断路器故障时, 停电的回路不会超过两回, 即使当线路回路故障而断路器又拒绝动作时, 情况也相同。②当检修任何一台断路器时, 不需进行隔离开关的倒换操作。③不需要装设选择故障母线的装置, 母线保护的二次回路比较简单, 但由于此接线的继电保护电流需要取自两组电流互感器, 而流经此两组电流互感器中的短路电流常不一致, 而且这两组电流互感器的误差也常不相同, 所以需要采取必要的措施。④对线路自动重合闸, 由于此接线中的每一回路需要由两台断路器控制, 所以二次回路也比较复杂。⑤此接线中还需在每回线路上装设电压互感器, 使继电保护装置能取得可靠的电压电源。

采用一个半断路器接线时的要求是: ①两台变压器或双回路应该分别连接到不同的串上, 以免发生两台变压器或双回路同时跳闸; ②进线和出线回路数最好相等, 以免在同一串中有两个回路向相同方向出线; ③发电机及其送出线路最好布置在同一串中, 在变电所中电源进线回路最好与降压变压器回路布置在同一串中。

(尤国铭)

Yierhe feitongbu lianluozhan

**伊尔河非同步联络站** (Ecl River asynchronous interconnection station) 加拿大东部新不伦瑞克省和魁北克省两电力网间实现交-直-交型耦合的高压直流背靠背换流站。它是世界上第一个全部采用晶闸管阀的直流工程, 于 1972 年建成并投入运行。加拿大魁北克 (Quebec) 系统邱吉尔瀑布水力发电厂向新不伦瑞克 (New Brunswick) 系统输电 300

MW，以满足负荷需求，但受到系统稳定性的限制。建设该同步联络站的目的是为了使这条输电线路可以摆脱同步运行稳定问题。

该工程额定功率为 320 MW，允许的长期过载量为 10%，额定直流电压为  $2 \times 80$  kV。直流主接线为单极，每两套 12 脉动换流器背靠背地接成一组，共两组。总计有 12 脉动换流器四套。如果有一组单元换流器损坏时，另一组可以继续运行。全站共用了 9600 个空气绝缘风冷晶闸管元件。晶闸管元件是光触发的。换流器是由美国通用电气公司 (General Electric Co., USA) 制造的。

站中共有四组由三台单相变压器组成的三相换流变压器组，三相组的额定容量为  $3 \times 55$  MV·A，额定电压为  $230 \pm 12\% / 34.5 / 34.5 / 13$  kV。四组换流变压器对称地布置在站的两侧，每侧两组，以实现两组背靠背单元的交流端口各自与两侧交流 230 kV 电力网相连接和耦合。每台单相变压器有四个绕组。高压绕组接至 230 kV 交流主母线。低压绕组接到 13 kV 母线，以连接交流谐波滤波器和同步调相机。每台变压器还有两个中压绕组分别与其它两相的相应绕组连接成 Y 形和  $\Delta$  形，提供两组相位差  $30^\circ$  (基波电角度) 的换相电压，并接到各自的换流桥，以构成一个十二脉动换流单元。

站的两侧交流端都设置了 11、13 次和高通谐波滤波器。在整流侧还另设 5 次交流谐波滤波器用以抑制局部的谐波谐振过电压。此外，还采用同步调相机作为无功补偿设备，其单机容量为 110 Mvar，共有 3 台，其中 2 台设置在整流侧。

(任 震)

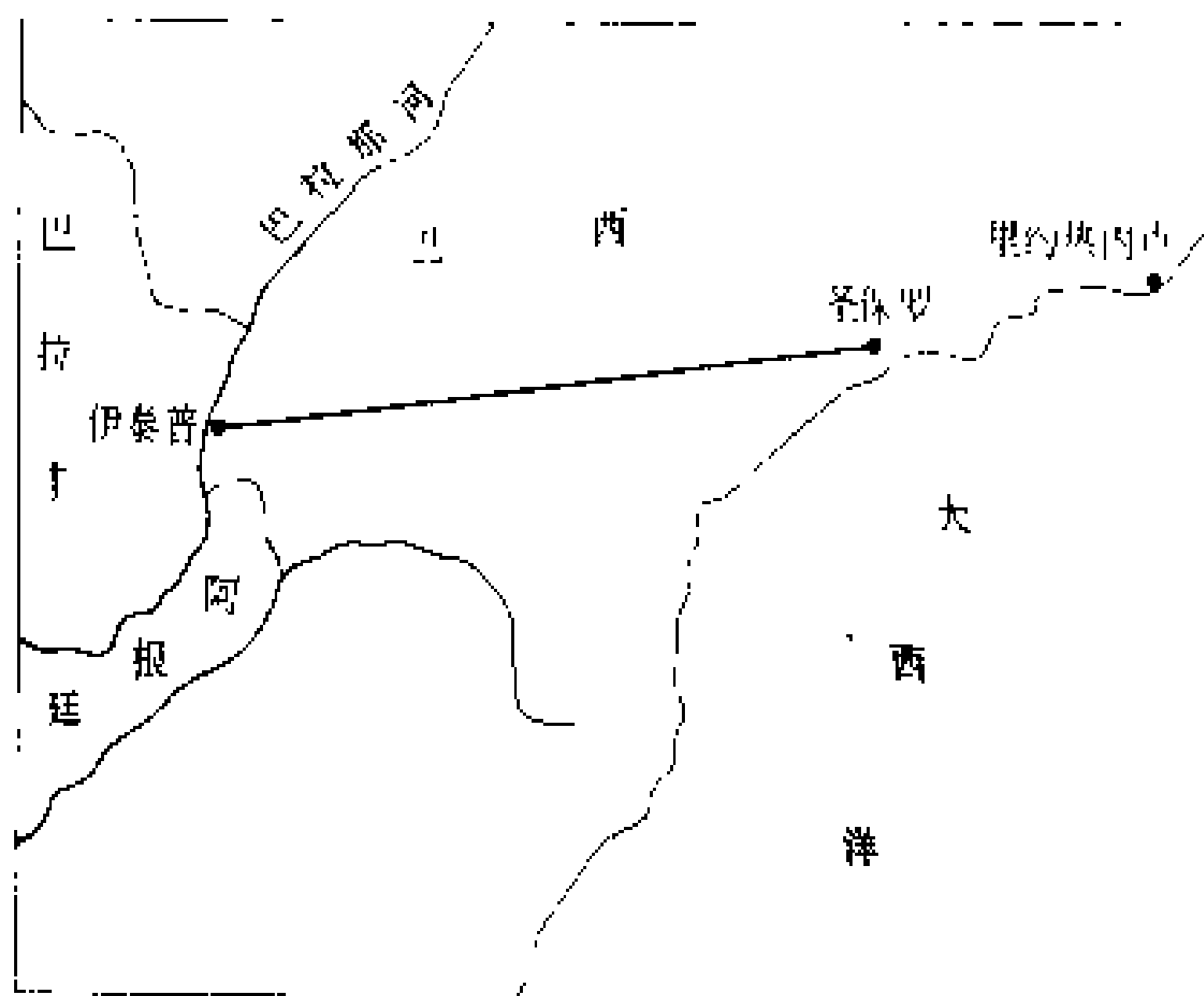
Yitaipu zhiliu shudian gongcheng

**伊泰普直流输电工程** (Itaipu HVDC transmission project) 世界上已建成投运的输电电压最高、输送功率最大的直流输电工程。它是将伊泰普水电站的电力输送到巴西圣保罗工业区的超高压直流输电工程。地理位置如图所示。

位于巴西和巴拉圭边界上的伊泰普 (Itaipu) 水电站是目前世界上最大的水电站，总装机容量达 12600 MW，共安装单机容量为 700 MW 的水轮发电机组 18 台，其中 9 台的频率为 60 Hz，另 9 台的频率为 50 Hz，供电给直流输电系统。

伊泰普水电站的电力通过两条  $\pm 600$  kV 直流输电线路和三条 765 kV 交流输电线路输送到巴西和巴拉圭的用电负荷中心，其中两条双极直流线路是输电到巴西的圣保罗工业区，每条线路输送功率为 3150 MW，电压为  $\pm 600$  kV，电流为 2625 A。两条直流架

空线路的长度分别为 783 km 和 806 km，彼此之间的最小距离为 10 km。直流架空线路的导线采用  $4 \times 689$  mm<sup>2</sup> 的钢芯铝线分裂导线。第一条双极直流线路于 1986 年建成，第二条按原计划于 1987 年建成。



伊泰普直流输电工程地理位置图

换流站采用双极四桥接线方式。换流器采用户内式、水冷、空气绝缘并组成四重阀的结构晶闸管阀。每只晶闸管阀由 8 个组件串联构成，每一组件包含 12 只串联的晶闸管元件，其额定参数为 4.5 kV，2625 A。

在两端换流站中，均装设交流滤波器和直流滤波器，在圣保罗端逆变站中还装有同步调相机和并联电容器等无功补偿装置。

(任 震 赵智大)

yibing xiangjiao dianlan

**乙丙橡胶电缆** (ethylene propylene rubber cable) 用乙烯和丙烯经催化剂合成的橡胶作为绝缘的一种固体挤压聚合电缆，简称 EPR 电缆。乙丙橡胶的介质损耗因数较大，因此只用在电压等级低于 138 kV 的电力电缆线路中。由于乙丙橡胶的良好抗水性，乙丙橡胶电缆适宜用作海底电缆，更由于乙丙橡胶具有很好的柔软特性，乙丙橡胶电缆在敷设环境条件较严格的处所 (如矿井、船舶等) 更为适用。

乙丙橡胶属于热固性材料，有较好的耐热性，其长期允许工作温度为  $90^\circ\text{C}$ ，允许过载温度为  $130^\circ\text{C}$ ，允许短路温度为  $250^\circ\text{C}$ 。此外，乙丙橡胶电缆尚具有优良的抗臭氧和抗电晕性能，是其它固体挤压聚合电缆所不及的。

20 世纪 60 年代初，乙丙橡胶就被用作为电力电缆的绝缘材料，其后许多国家 (特别是意大利和西班牙)，在相当宽的电压范围内使用乙丙橡胶电缆，中国主要用于船用较低电压电缆。70 年代后，虽然经过不断改进，降低了乙丙橡胶的介质损耗因数，生产了 138 kV 的乙丙橡胶电缆，并通过了长期老化试验，但终因

价格昂贵,难于和交联聚乙烯电缆相竞争。乙丙橡胶电缆只应用于 35kV 及以下的电缆线路中。

参考书目

汪景璜,邹元传. 电缆材料. 北京:机械工业出版社, 1983  
McAllister D. Electric Cables Handbook. Granada publishing Limited, 1982

(桑纪明)

Yidali Diangong Jishu Shiyao Zhongxin dagonglu shiyanzhan

**意大利电工技术试验中心大功率实验站**  
(high power laboratories of Italian Electrical Experimental Centre) 简称 CESI 大功率实验站。位于意大利米兰市,其网络试验站于 1958 年建成,扩建的冲击同步发电机于 1981 年投运,两者可并联运行。全部测量和控制部分采用光纤系统,技术水平居世界本行业领先地位。

冲击同步发电机最大直接试验功率为:三相 2000 MV·A、0.3 s,两相 1200 MV·A、0.3 s,试验电压为 0~38 kV,频率为  $16\frac{2}{3}\sim 60$  Hz,电流为 130 kA。试验间尺寸:1 号间为 7 m×9 m×8 m(高),2 号间为 7 m×6 m×8 m(高)。

由电力系统引进 220 kV 线路二回,试验变压器有三台(220/4×15、4×10 kV),最大短路功率为 3000 MV·A(三相)或 2600 MV·A(两相)。该站可获得的空载长线线长达 500 km,切电容器组的电容器功率为 32 Mvar,近区故障试验电流可达 63 kA。

合成试验的电流回路参数为 60kV、120kA、 $16\frac{2}{3}\sim 60$  Hz;电压回路储能为 3MJ,充电电压可达 550 kV(直流),最大引入电流为 32 kA(峰值),引入频率为 350~700 Hz。

关合试验的最高试验电压为 315 kV。

户外试验间尺寸为 20 m×20 m×15 m(高)。户外试验区对绝缘子的耐弧试验或高压隔离开关的电动力试验参数可达 63 kA、1 s,对隔板进行电动力试验参数可达 80 kA、1 s。

参见彩图插页第 46 页 135 图。

(顾克鸿)

Yidali Diangong Jishu Shiyao Zhongxin gaoya shiyanshi

**意大利电工技术试验中心高压实验室** (high voltage laboratories of Italian Electrical Experimental Centre) 简称 CESI 高压实验

室。位于意大利米兰市内,建于 1958 年,是西欧研究超高压技术著名的大型户内式高压实验室。该实验室有两个毗连的试验大厅:超高压试验大厅尺寸为 45m×40 m×35 m(高),高压直流试验大厅尺寸为 40 m×40 m×35 m(高)。两个大厅均为单层钢结构。大厅内主要设备有:4.8 MV、200 kJ 的冲击电压发生器,2.4 MV、1A 的串级工频试验变压器,±2 MV、10 mA 的直流高压发生器,±1.2 MV、30 mA 直流高压发生器以及各种与上述设备配套的辅助和测量设备。

大厅内还有四个用塑料膜围成的人工污秽试验室。一号室尺寸为 18 m×16 m×11 m(高),试验电源为 700 kV、1 A 的串级工频试验变压器,其短路电流大于 15 A。二号室尺寸为 15 m×15 m×21 m(高),试验电源为 1.6 MV、2.5MV·A 的串级工频试验变压器,其短路电流大于 20 A。一、二号室共用一台±700 kV、1A 的直流高压发生器作为直流人工污秽试验的电源。

为了检验电子仪器设备抗电磁干扰的能力,在大厅内还建成了一个电磁兼容性试验室。室中的消电磁波反射室的尺寸为 14 m×10 m×5 m(高),专用屏蔽室的尺寸为 9 m×9 m×3 m(高),在 40 GHz 频率下,电场屏蔽效果大于 100 dB,磁场屏蔽效果大于 65 dB。

该实验室还建有六个不同尺寸和参数的热老化试验室,可进行电气设备或器材的人工老化试验。另外,还有三个人工气候室,可进行不同气候条件下的设备电气性能试验和研究。

参见彩图插页第 44 页 130 图。

(郑健超)

Yidali Lecco tieta shiyanzhan

**意大利 Lecco 铁塔实验站** (Italian Lecco tower testing station) 意大利 SAE 公司的 Lecco 铁塔实验站,位于莱科(Lecco)城附近,座落在一山谷之中,创建于 1948 年,是世界上最早的铁塔实验站。1979 年改造了测控系统,整个试验过程采用了以电子计算机为中心的自控系统。几十年来,为世界各地做了大量的铁塔试验,从而为铁塔设计与研究积累了不少宝贵的经验。该站曾试验过 765 kV 的输电线路铁塔,是当今世界效益最高的铁塔实验站。站内主要设施有:①主控制楼及试验室;②万能基础及加荷塔;③组装场;④铁塔加工厂;⑤悬臂吊及汽车吊。

万能基础 见线路杆塔试验。该站设有三个型式不同的万能基础,建在山谷最低处的岩石上。基础本体为 2 m 厚的混凝土板块。其中 15 m×25 m 的矩形万能基础,基面上设有三条间隔为 5 m 的通长沟槽。



米形沟槽的万能基础，最长沟槽为 18 m。X 形沟槽的万能基础，沟槽长为 12 m。与沟槽相配的活动钢梁最长为 14 m。被试铁塔的塔脚固定在钢梁上或专制的支座上，再用放置在沟槽中的长螺栓将钢梁或支座固定在万能基础上。允许铁塔塔脚最大上拔力为 3670 kN。

加荷塔 试验杆塔时加载用的支撑结构。该站设有一座横向加荷塔和五座纵向加荷塔，分别设在南北向的山顶上，塔高 10~22 m，塔的高程为 50~60 m（以万能基础的基面为零米）。为满足不同高度加载的要求，在南北山坡上还各设有间隔为 0.5 m 的若干地锚。

加荷装置 一座能覆盖整个试验场、吊臂为 45 m 长的悬臂吊和一辆汽车吊，用来吊运和安装被试铁塔。三个万能基础能同时组装被试铁塔。无级电动卷扬机为 24 个加荷点提供水平与垂直荷载。卷扬机由计算机和手动控制，可同步运行。每一加荷点的荷载的矢量图，由计算机控制。

控制楼与试验室 设在 8 m 高程处的主控制楼，能方便地观察全场情况。试验室内装有计算机，依靠计算机程序，自动控制全部试验数据的测取、对比、处理及自动加卸荷载，并能处理提前破坏、突然停电及计算机故障等各类突发事件。试验室内还设有 588 kN 的材料试验机等，以校验传感器以及塔材的性能与强度。

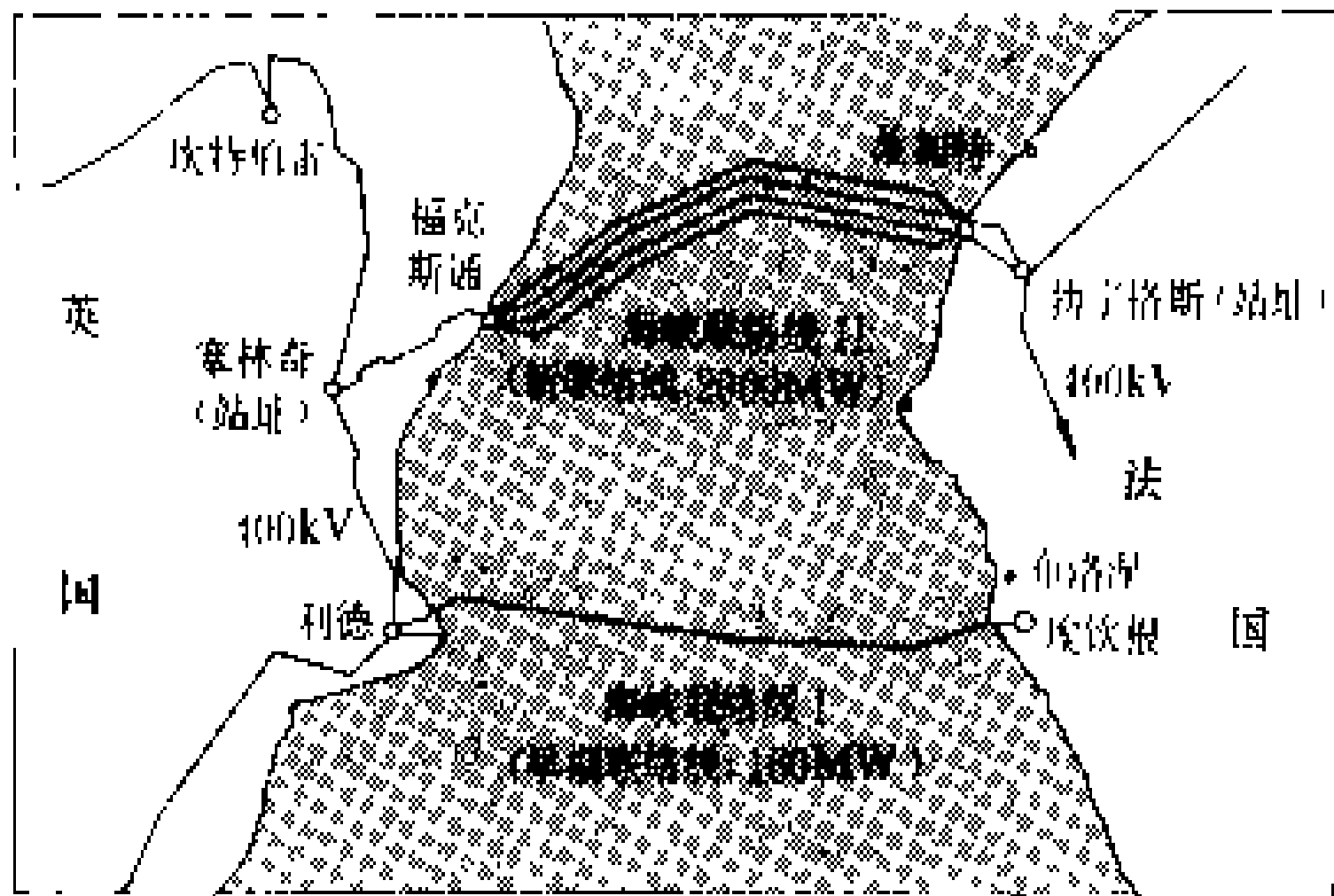
铁塔挠度采用经纬仪测量，对铁塔杆件不测量其应变。

(郑仁坪)

yingfa haixia zhiliu shudian gongcheng  
**英法海峡直流输电工程** (United Kingdom-France cross channel HVDC transmission project) 目前世界上输送功率最大的直流海底电缆线路工程，也是第一个在换流站装设自饱和式静止型无功补偿器的直流输电工程。英国和法国由于存在一小时的时差，除了它们的日负荷曲线有所不同之外，两国的最大和最小负荷在时间上错开。而且两国在电源构成方面亦有较大差异，英国以火力发电为主，而法国水电占有相当大的比例。为合理利用水、火电源，尖峰负荷时互相支援，英法两国决定建设互联输电线。技术经济论证表明，以采用直流联网方式为最佳。英法海峡直流输电工程先后建设了 160MW 直流联网工程和 2000 MW 直流联网工程两部分。

(1) 160 MW 直流联网工程。这一部分工程于 1961 年投入运行。换流站分别设在英国肯特郡 (Kent) 的利德 (Lydd) 和法国布洛涅 (Boulogne) 东南 7 km 处的埃钦根 (Echinghen)，经 14.3 km 陆地电

缆 (英国侧 6.8 km，法国侧 7.5 km) 和 50.8 km 海底电缆将英国 275kV 交流电力网及法国 225 kV 交流电力网联为一体。其路径如图所示。换流桥由汞弧阀组成 (1974 年法国 Y,y 接线一侧的一号换流桥改用晶闸管阀)，直流输送功率 160 MW，直流电压  $\pm 100$  kV，直流电流 800A，双极接线方式。其主要设备参数见表 1。



英法海峡直流工程路径图

表 1 英法海峡 160 MW 直流工程主设备参数表

项目	利德换流站	埃钦根换流站
系统电压	275 kV	225 kV
换流阀	汞弧阀：100 kV，800A	汞弧阀：100 kV，800 A；1974 年一极换成晶闸管阀，风冷，空气绝缘
换流变压器	95 MV·A，284 $\pm$ 15%/83. 6/33 kV，具有自动分接头调节	97. 6 MV·A，232 $\pm$ 15%/86. 3 kV，具有自动分接头调节
交流滤波器	60 Mvar (33 kV)	50 Mvar (225 kV)

该工程的海底电缆要横跨来往船只很多的英吉利海峡，因而海底电缆经常被船锚或拖网所损坏。到 1984 年时，这条联络线的作用已不明显，故决定停运。

(2) 2000 MW 直流联网工程。基于 160 MW 直流联网工程 15 年的实际运行经验，英法两国认为联网是很必要的。1974 年两国决定建造新的输送功率为 2000 MW 的直流联网工程。此项工程始建于 1981 年，于 1986 年投入运行。换流站分别建在英国的塞林奇 (Sellindge) 和法国的勃宁格斯 (Bonningues)，通过 25 km 陆地电缆 (英国侧 18.5 km，法国侧 6.5 km) 及 45 km 海底电缆将两国 400 kV 交流电力网相联，其路径如图所示。为防止船锚或拖网损坏海底电缆，将海底电缆埋入海床 1.5 m 以下。换流阀由晶闸管阀组成。直流输送功率为 2000 MW。直流系统采取两个双极接线

方式，每一个双极系统的直流电压±270 kV，直流电流 1852 A，输送功率 1000 MW。其主要设备参数见表 2。

表 2 英法海峡 2000 MW 直流工程  
主设备参数表

项 目		塞林奇换流站	勃宁格斯换流站
交流系统电压		400 kV	400 kV
换流阀		晶闸管阀，空冷，空气绝缘，直径 55 mm，两元件并联	晶闸管阀，空冷，空气绝缘，直径 77 mm，两元件并联
换流变压器		三相，50 Hz，315 MV·A，400 <sup>+23%</sup> / <sub>-9%</sub> kV，具有自动分接头调节	单相，50 Hz，206 MV·A，400±10%/118/118/3 kV，具有自动分接头调节
平波电抗器		空芯式，电流在 0~2220 A 时，电抗值为 350~390 mH	空芯式，电流在 0~2220 A 时，电抗值为 350~390 mH
无功补偿设备及滤波器	静止无功补偿器	自饱和电抗器：2×±150 Mvar	无
	交流滤波器	双调谐、三调谐式：8×130 Mvar	双调谐、三调谐式：8×160 Mvar

(赵皖君 邢俊杰 赵智大)

yingmian xian dao

迎面先导 (facing leader) 见雷云放电过程。

yingmuxian xuanze

硬母线选择 (selection of hard bus bar)

由铝排、铝管或铜管等硬导体材料构成的母线称为硬母线。硬母线选择方法基本上按母线选择的一般条件进行，只是机械计算比较复杂，而机械条件往往是硬母线选择的控制条件。硬母线的机械计算包括荷载组合、强度计算、挠度计算和微风振动校验四方面的内容。

荷载组合 硬母线的荷载分为正常荷载和短时荷载。正常荷载指长期作用在硬母线上的荷载，包括自重、风力、覆冰及引下线和单柱式隔离开关静触头的自重。前三种荷载为均布荷载，后两种荷载是集中荷载，其应力和挠度的力学计算公式不同。此外，风荷载为水平方向，其余荷载是垂直方向，两类作用方向不同的荷载组合采用矢量相加的方法。短时荷载指瞬时作用在硬母线上的荷载，包括短路荷载

和地震荷载。荷载组合分成以下两种状态：①正常荷载组合，最大风状态为  $\sqrt{\overline{M}_1 + \overline{M}_2 + \overline{M}_3}$ ，覆冰状态为  $\sqrt{\overline{M}_1 + \overline{M}_4 + \overline{M}_5 + \overline{M}_3}$ ，取其大者；②短路荷载组合，短路状态为  $\sqrt{\overline{M}_1 + \overline{M}_6 + \overline{M}_3 + \overline{M}_7}$ ，地震状态为  $\sqrt{\overline{M}_1 + \overline{M}_8 + \overline{M}_3 + \overline{M}_9}$ ，取其大者。式中  $\overline{M}_1 \sim \overline{M}_9$  分别为自重、最大风、引下线、覆冰、小风、 $\frac{1}{2}$  最大风、短路、 $\frac{1}{4}$  最大风、地震的荷载； $\overline{M}$  为各分项荷载的矢量值。

强度计算 硬母线的强度可按正常、短时两种荷载组合公式进行计算。正常荷载组合的安全系数取 2，短时荷载组合的安全系数取 1.67。强度计算时的要点为：①计算各种荷载产生弯矩的简化力学模型（受力图）与硬母线金具的安装距离有关，伸缩节和滑动支持金具简化成滑动铰支座，固定支持金具简化成固定端。此外，按工程中硬母线实际安装跨度以及金具安装情况，选择最严重的条件进行计算，通常选择一端简支、一端固定的单跨梁进行计算。②硬母线同相片间电动力和相间电动力都与硬母线的自振频率有关，工程中通常采用修正静态法，查有关曲线进行计算。

挠度计算 硬母线的挠度通常按无冰、无风的自然状态进行计算。一般要求支持式硬母线的计算挠度小于  $(0.5 \sim 1) D$ ，悬吊式硬母线的计算挠度小于  $(1 \sim 2) D$ ， $D$  为硬母线外径。

微风振动校验 只需要对支持式硬母线进行微风振动的校验，悬吊式硬母线不会发生微风振动，不需要进行校验。通常风速为 1~5 m/s 时，才能够形成稳定的气流，使硬母线发生共振。发生微风振动的硬母线自振频率在 1~10 Hz 范围内。防止微风振动的措施一般有以下几种：①在硬管母线的内部穿入钢芯铝绞线，防止硬管母线产生高阶微风振动；②结合单柱式隔离开关静触头设计，安装双环型消振器；③单独在硬管母线上安装消振器。后两种措施对于消除各阶微风振动都比较有效。

硬母线不会产生风偏摇摆，可以减少母线的相间距离，从而压缩配电装置的占地面积，因此在国际上被广泛采用。在不同的电压等级往往采用以下几种不同形式的硬母线：①6~10 kV 配电装置通常采用矩形或槽形导体构成的母线桥，相间距离为 0.5 m 左右，跨度为 1.5~2 m；②35~220 kV 配电装置通常采用单根圆形铝管或异形铝管构成的大跨度铝管母线，铝管外径一般在 130 mm 以下，相间距离 1~3 m，跨度 5~14 m，在配电装置 2~3 间隔之间配置一个母线伸缩节，安装 1 跨铝管母线；③330~500 kV 配电装置一般采用大直径单根圆形铝管母线，铝管母线外径为 150

~500 mm，一个 500 kV 配电装置间隔安装 1 跨铝管母线，相间距离为 4~5 m。为了节省铝材，目前有采用分裂结构铝管母线的趋势。美国 TVA 电力系统 500 kV 配电装置采用 4 分裂结构铝管母线，分裂间距 610 mm，单根铝管母线外径为 38.1 mm。中国葛洲坝水电站 500 kV 升压站也采用 4 分裂铝管母线，分裂间距为 450 mm，单根铝管母线直径为 45 mm，相间距离为 6 m，计算跨距为 30 m，最大工作电流为 3460 A。

参考书目

蓝增珏，袁达夫，35~500 kV 铝管母线配电装置，北京：电力工业出版社，1982  
蓝增珏，叶景星，500 kV 变电所电气部分设计及运行 上册，北京：水利电力出版社，1987  
(蓝增珏)

yonghu biandiansuo

**用户变电所** (consumer substation) 向工矿、交通、邮电和大型建筑物等较大负荷或特殊负荷供电的变电所。它从电力网受电降压后直接向用户的用电设备供电。大型工矿企业用户通常设有 110~220 kV 总变电所，然后按生产流程再设 10~35 kV 分变电所。其他用户变电所的高压电压通常为 10~35 kV，降压后向用电设备供电。用户变电所的低压电压通常采用 380 V，有些国家还采用 660 V 低压电压。

当变电所的供电负荷稳定，不考虑再扩建，采用较简单的电气主接线（如桥形接线等），变电所的设施也较简单。这种较简单的主接线通常为线路末端的变电所即终端变电所所采用。终端变电所的高压电压通常为 110 kV 及以下，以 35 kV 为最多。

(赵正铨)

youjinzhi jueyuan dianlan

**油浸纸绝缘电缆** (oil impregnated paper insulated cable) 以油浸纸作为绝缘的电缆。主要用在 35 kV 级及以下的配电系统中。按浸渍油的不同，可分为粘性浸渍纸绝缘电缆和滴流电缆两大类。按绝缘层的绕包结构不同，这两类电缆又都可分为带绝缘电缆、屏蔽型电缆和分铅型电缆。

随着输配电电压的提高，为使油浸纸绝缘电缆的绝缘适应更高的电压等级，相应的办法是增加油浸纸绝缘的厚度。但是电压发展到 63 kV，即使增加油浸纸绝缘厚度，由于负载变化会引起绝缘纸层间周期性的热胀冷缩，形成微气隙，因而产生游离，使绝缘老化，最终也会导致绝缘击穿。因此油浸纸绝缘电缆只能适用于 35 kV 及以下的电力系统。

1891 年费兰蒂 (Ferranti) 创造了以粘性油作为浸

渍剂的 10 kV 级绝缘的电缆，其中最后一段至 1933 年才退出运行，当时用油浸纸绝缘以铅套密封的电缆，几乎满足了各种电力传输的需要。其后发现在高差较大的电缆线路中，粘性油有下淌的缺陷，因此发展了滴流电缆。20 世纪 60 年代，固体挤压聚合电缆发展后，油浸纸绝缘电缆在许多国家已被逐渐淘汰。

(陆德线)

yuzhi dianlan zhongduan

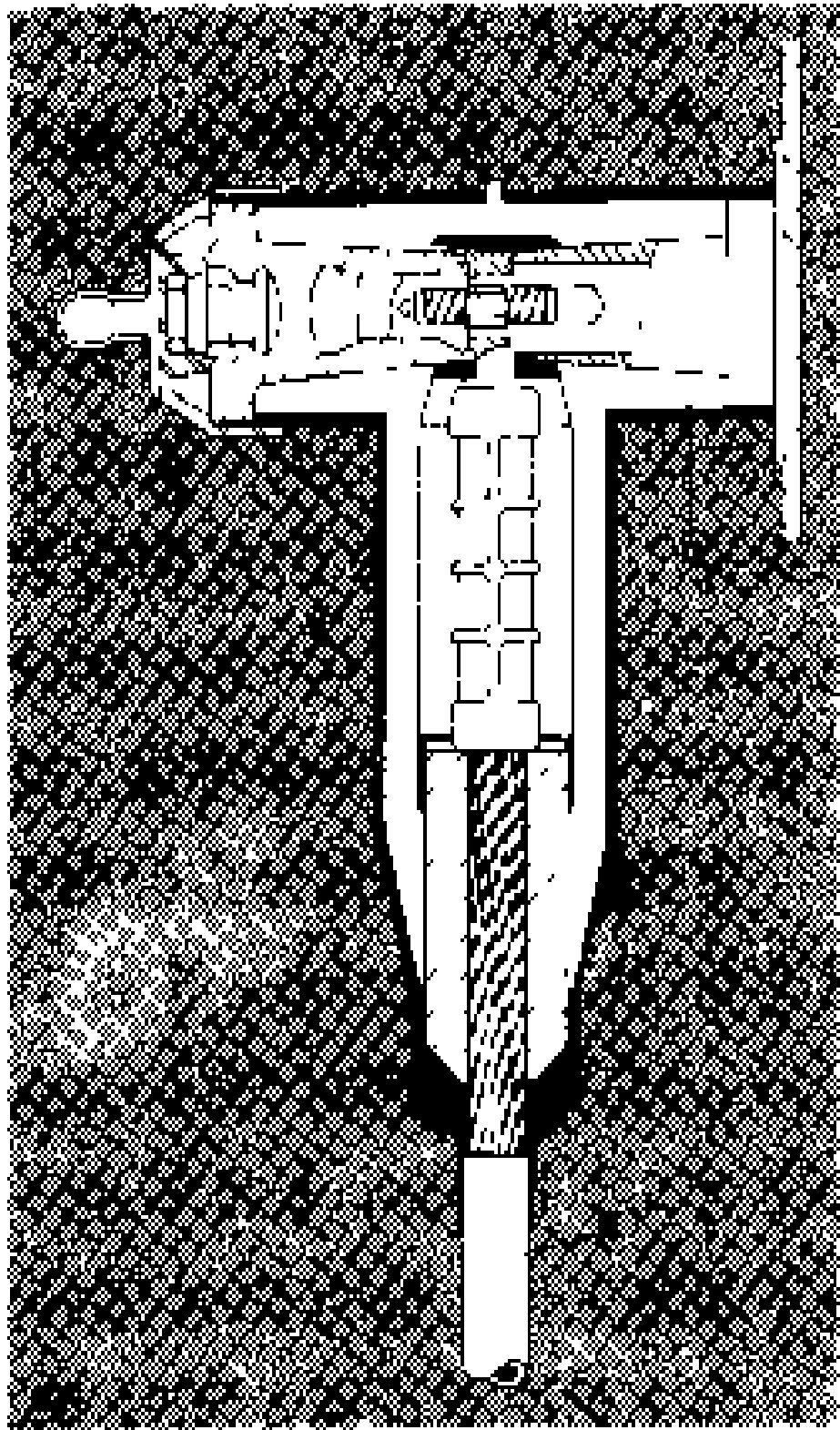
**预制电缆终端** (premould cable terminal)

用乙丙橡胶、硅橡胶或三元乙丙橡胶制作的成套模压件。其中有电缆应力锥、绝缘套管及接地屏蔽层等各种部件，现场只需将电缆绝缘作简单的剥切后，即可进行装配。它可以做成户内、户外或直角终端，用在 35 kV 及以下的单芯固体挤压聚合电缆线路中。

电缆终端事故率很高，其原因之一是现场装配受到环境和工艺的影响。预制终端是尽可能将在现场装配的工序改在工厂内预先完成，在工厂内测试预制终端的电性能，从而保证了质量。

预制终端虽有安装简单、省时等优点，但缺点是模压件的内径必须与电缆绝缘的外径相仿，并且电缆芯必须是圆形。模压件内径过大，则套入后的界面上存在较多气隙，过小则不易套上电缆芯，因此制作模压件前必需了解电缆的精确尺寸。

终端的轴线与电缆轴线成直角的预制终端又称直角电缆终端，其结构如图所示。



直角电缆终端主要用作连接小型组合开关柜和电缆分支箱等，它不但能起到电缆终端的作用，有的还兼有验电和线路闸刀投切的功能。直角电缆终端有良好的外屏蔽层，不需保持必要的相间或对地电气距离。直角终端是 20 世纪 40 年代在美国首先开创使用的，50 年代起固体挤压聚合电缆逐渐取代油浸纸绝缘电缆后，预制电缆终端陆续得到发展，并在预制工序上不断得到完善，现今仍在继续改进中。

(李松荪)

Yuanbaoshan - Jinzhou - Liaoyang shudian xianlu  
**元宝山—锦州—辽阳输电线路** (Yuanbaoshan - Jinzhou - Liaoyang transmission line)

中国第一批 500 kV 超高压输电线路工程项目之一，简称元锦辽线。该线路从内蒙古自治区赤峰市元宝山发电厂引出，经辽宁省锦州变电所至辽宁省辽阳变电所，全长 373 km，单回路。线路经过地区平地占 40%，丘陵占 32%，山地占 28%，跨越老哈河、大凌河、辽河、太子河、浑河共 6 处。全线分两段，元锦段（元宝山发电厂至锦州变电所）长 214 km，设计输送容量 700 MW，于 1985 年 11 月投运；锦辽段（锦州变电所至辽阳变电所）长 159 km，设计输送容量 880 MW，于 1984 年 1 月投运。

该线路共有杆塔 864 基，主要是酒杯型铁塔和内拉线门型塔，此外还试用了 19 基 AII 型预应力钢筋混凝土杆。

导线为每相四分裂 LGJQ-300 轻型钢芯铝绞线，跨河段采用每相四分裂的 LGJJ-300 加强型钢芯铝绞线。操作过电压水平为 2.5 倍相电压，相间距离取 13 m。直线塔悬垂绝缘子串采用 28 片 XP-16 型瓷绝缘子；污秽地区用 XP3-16 型大爬距瓷绝缘子 9 片加 19 片 XP-16 型瓷绝缘子；跳线用 29 片 XP-7 型瓷绝缘子；耐张塔采用双串 28 片 XP-21 型瓷绝缘子。采用上扛式线夹，优点是对绝缘子电压分布有均压效果，因而取消了均压环，缩短了绝缘子串长度。架空地线用 LBGJ-120 铝包钢绞线和 GJ-70 镀锌钢绞线，跨河段用 GJ-100 镀锌钢绞线，用 XDP1-7 型瓷绝缘子使架空地线对地绝缘，以便用于载波通信。

该线路施工采用张力架线工艺（见架线施工）。线路造价 24.3 万元/km，导线 13.74 t/km，架空地线 1.39 t/km，杆塔钢材 28.9 t/km，水泥 25.5 t/km，绝缘子 275.7 片/km，金具 0.92 t/km，木材 2.0 t/km，每千米施工用工量为 3400 工日。

参见彩图插页第 4 页 12 图。  
(胡维新)

yuanshuan shudian  
**远距离输电** (long distance power transmission)

以多种技术措施实现远距离输送大容量电力的综合技术。远距离输电概括起来可分为交流远距离输电与直流远距离输电两种模式。直流远距离输电即高压直流输电，简称直流输电。由于一次能源分布的不均匀性，常常与用电中心在地理位置上不一致，特别是水力资源与负荷中心相距更远，因而远距离输电越来越成为电力工业发展的必然趋势。两种远距离输电的模式也各有自己的特点（见直流输电与交流输

电）。

实现远距离交流输电的技术措施通常有：①中间开关站；②串联电容补偿；③中间并联补偿；④提高交流输电电压。

**中间开关站** 设置中间开关站是输电线路规划设计中的一种技术措施。中间开关站使长线路分段，借以降低线路过电压水平，加速潜供电弧自灭，提高输电线路安全稳定水平与输电容量。中间开关站通常用于双回路及多回路输电线路。为了避免线段断开后，线路中间的暂时过电压水平过高和使并联电抗器容量易于匹配，线路的分段长度一般不超过 300 km。

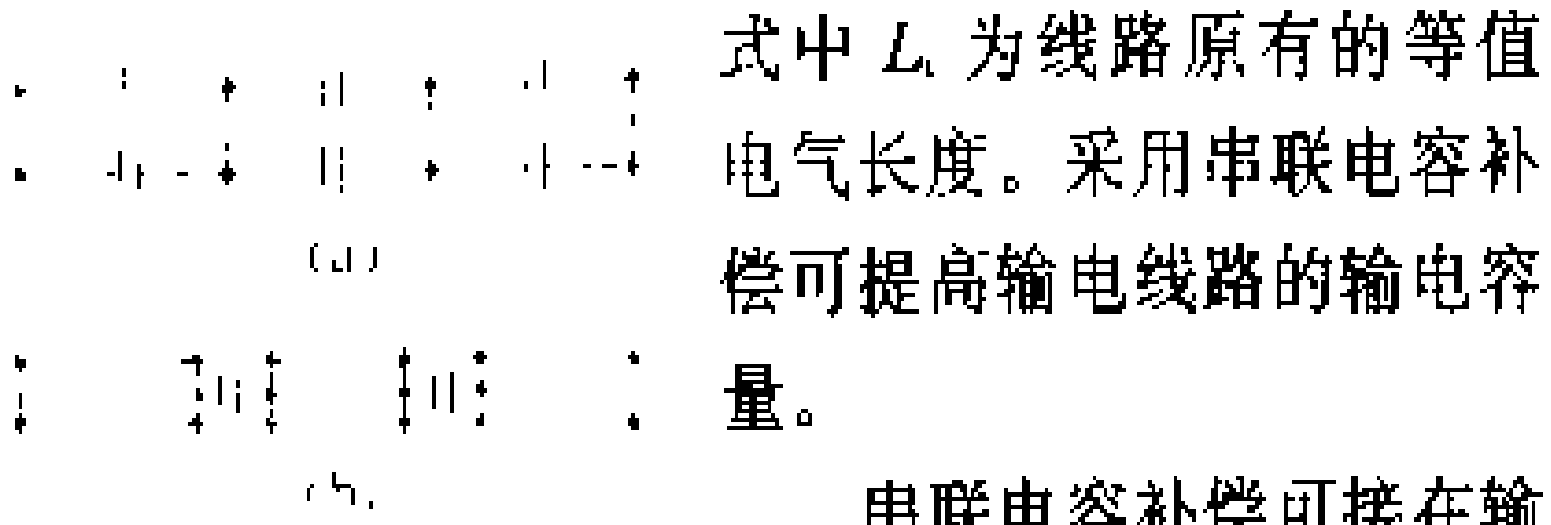
中间开关站的主接线与一般变电所的相同，多角形接线、双母线接线以及一个半断路器接线等均可使用。由于中间开关站不须或很少从输电线路吸取功率，故其主接线比一般变电所的规范化。串联电容补偿装置可装设在中间开关站中。

输电线路分段后，线路暂态稳定水平提高，因为分段线路故障时断开故障段线路后，输电线路等值长度的增加小于不分段线路。分段数愈多，等值长度增加愈少，故障开断对系统的稳定度影响愈小。

输电线路的回路数，一般是由正常输电容量决定，增加回路数将增加线路总投资。分段数一般是由线路长度决定，增加分段数也要增大总投资。若为提高线路的稳定度而增加回路数和分段数，须作技术经济分析比较。

**串联电容补偿** 串联电容补偿（见串联补偿装置）又称纵补偿，它以串联在输电线路上的电容器的容性电抗，补偿输电线路上的感性电抗，以缩短输电线路的等值电气长度。串联电容的容性电抗  $X_C$  与所补偿线路的感性电抗  $X_L$  之比  $K_C$ ，称为串联补偿度，一般以百分数表示。经串联电容补偿后的线路等值电气长度为

$$L = L_0(1 - K_C)$$



**图 1 带有串联电容补偿的分段远距离输电线路**

(a) 电容器装在线路上；故障开断后串联电容亦随之切除，串联补偿度值不变。串联电容装在中间开关站内时，电容器不随线路的开断而被切除，串联补偿度值将下降。为使故障线路切除后串联补偿度不变，甚至增

大,以补偿故障后线路阻抗的增加,在切除故障线路的同时,切除部分串联电容器的并联组,使串联电容补偿容抗值也增大。这种方式称为串联补偿的强行补偿。一般认为串联补偿度不宜大于 0.7。

中间并联补偿 安装在线路中途以并联方式连接的几种补偿装置。由于补偿目的不同和补偿设备不同,中间并联补偿又分为并联电抗补偿、中间同步补偿和中间静止补偿三种形式,如图 2 所示。

(1)并联电抗补偿。目的主要在于补偿线路的充电功率,降低线路的空载过电压。用于远距离输电线的并联电抗器,直接接在线路上。并联电抗器的容量与所补偿线路的充电功率之比称为并联补偿度,其值一般大于 60%。其接线图如图 2 (a) 所示。(见并联电抗器)

(2)中间同步补偿。在输电线路中间接入同步调相机,利用同步调相机的过励和欠励运行的性能,在线路重载时向线路提供无功功率,在线路轻载时向线路吸取多余的充电功率,以维护线路电压和无功功率的合理分布,提高线路的输送能力和稳定水平。其接线图如图 2 (b) 所示。接入同步调相机需要利用变压器,并且同步调相机是旋转电机,本身的损耗大,维护工作量也大。(见同步调相机)

(3)中间静止补偿。以静止补偿装置代替上述同步补偿机。静止补偿装置可看作是阻抗可变的静止电器。它的电抗不仅大小可控,并且可由感性变成容性,

从而使线路的输送能力随之改变。在控制适当时,还能抑制线路低频振荡。装设在线路中间的静止补偿装置作用最大,装在线路两端的静止补偿装置对提高线路输送容量不起作用。直接接在线路上而不经变压器接入的静止补偿装置,还在研制过程中。经过变压器接入的静止补偿装置已投入实际使用,但由于变压器的漏抗也随之串接进电路,对提高线路输电容量的作用明显降低。其接线图如图 2 (c) 所示。(见静止补偿装置)

提高交流输电电压 提高交流输电的电压等级,是开拓远距离、增大输送容量的直接途径。从 20 世纪 50 年代开始,许多国家都在谋求提高电压等级。欧洲发展 380 (400) kV 电压,苏、美、加等国相继发展 500kV、750kV 电压等级(见输配电电压等级)。自 70 年代以来,苏联、美国等经济发达、幅员辽阔的国家均在研究特高压输电,苏联已有一条 1150kV 特高压输电线路经试运行后投产。

特高压输电需要研究解决一系列高电压技术问题与环境问题,包括技术条件、技术标准的制订,电气产品的研制与成型等。(见输配电技术展望)

直流输电 在远距离输电问题上,高压直流输电是一种在技术经济上与常规的交流输电方式有竞争能力的输电方式(见直流输电与交流输电)。而且,在特远距离、输送特大容量的情况下,直流输电也是一种在技术经济上与特高压输电极有竞争能力的输电方式。(见直流输电)

(费翔群)

yuanlifaf  
远离法 (distant method) 见接地电阻测量。

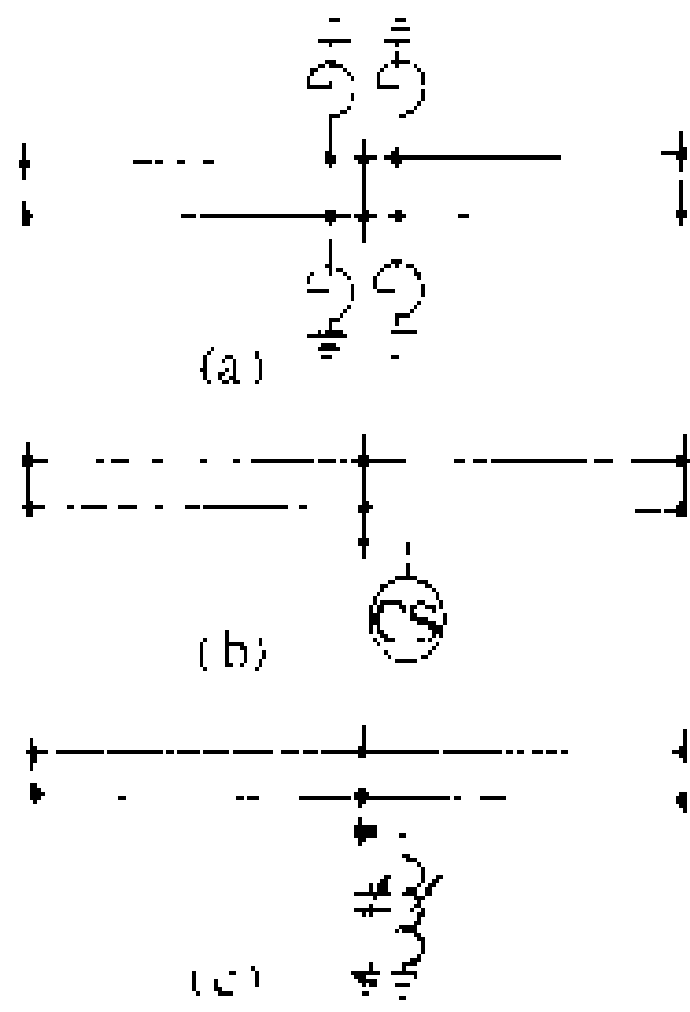


图 2 中间并联补偿  
(a) 并联电抗补偿; (b) 中间同步补偿; (c) 中间静止补偿

# Z

zanshi guodianya

**暂时过电压** (temporal overvoltage) 电力系统中在故障或操作引起的过渡过程之后的一段时间内出现的稳态性质的过电压。暂时过电压分为工频过电压和谐振过电压两种。空载线路中的电容效应是产生工频过电压的主要原因，在超高压长线路中尤为突出，需要采取并联电抗器等补偿措施加以限制。谐振过电压主要发生在由铁芯励磁电感或同步电机的时变电感及其端部电容所组成的振荡回路中，最高幅值可达额定电压的两倍以上，对电气设备的绝缘造成威胁，需要针对具体情况采取专门措施加以消除或限制它的存在时间。

(陈维贤)

zhenkong duanluai

## 真空断路器 (vacuum circuit breaker)

利用真空条件熄灭电弧的断路器。真空断路器适于频繁操作，能连续开断额定电流万次以上，在额定短路开断电流下也能连续开断数十次甚至上百次。真空断路器的灭弧部分不需检修，并无火灾危险。参见彩图插页第 21 页 65 图。

真空断路器主要由真空灭弧室（真空开关管）、绝缘支架和操动机构组成。它的灭弧室为一个玻璃或陶瓷容器，对接式触头和灭弧结构密封其中。触头外而有金属屏蔽罩，用以冷凝和吸收弧隙的金属蒸气，对灭弧起着重要作用。动触头的运动由操作机构通过金属波纹管实现。各种真空断路器灭弧室的剖面如图所示。

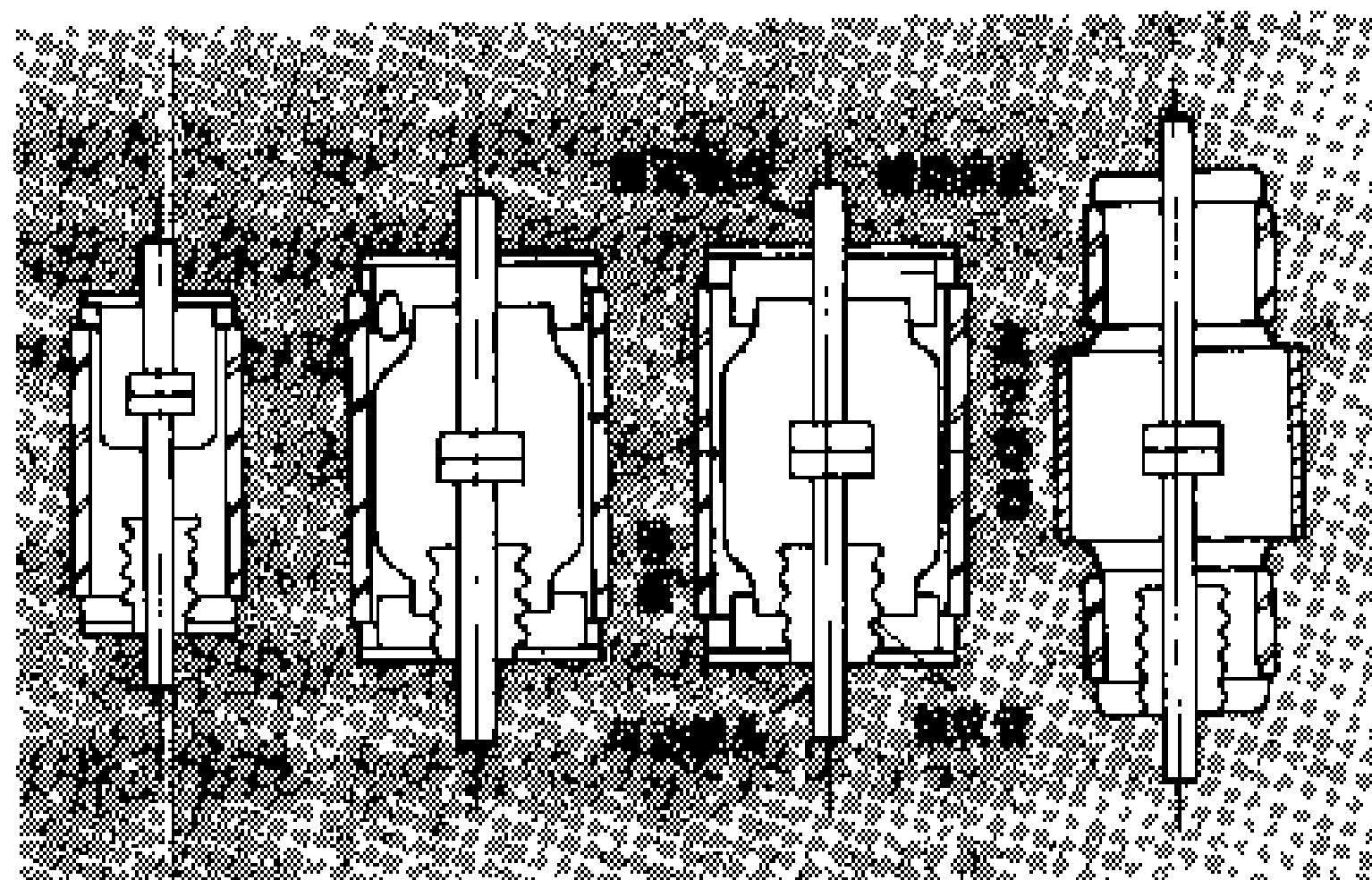
真空断路器的触头行程越长，对金属波纹管的使用寿命越不利。为使触头行程缩短，真空断路器一律采用对接式触头。触头的表面以螺旋形槽将它分割成几个扇形部分，利用电流流向的变化产生一定方向的磁场，电弧在磁场驱动下于触头间隙中快速旋转，从而加强冷却以熄灭电弧。但这种结构的触头表面耐弧能力较低。采用纵向磁场使电弧旋转的效果较好。

触头间的有限行程限制了真空断路器单断口的电

压水平，一般 10~20 kV 的真空断路器为每相一个断口，35 kV 级的每相 1~2 个断口。电压等级愈高，串联断口数愈多。日本生产的真空断路器单断口电压可达 84kV，并以此组成 242 kV、40 kA、额定电流高达 2000~3000 A 的真空断路器。

真空断路器一般是户内式结构。日本明电舍的 VBO 型 84/72kV、31.5 kA 用于户外的真空断路器，是将整体置于充 SF<sub>6</sub> 气体的接地金属箱壳中，再以高压套管引出，并附有电流互感器，三相总重达 3.7 t。

真空断路器在发展过程中遇到的困难有：①它的对接式触头可能会导致合闸弹跳，引起触头熔焊，并影响电流过零后断口间的绝缘水平；②开断大电流后，触头间的冲击耐压水平下降，下降幅度可达 30% 以上，使运行单位难于接受；③开断过程中可能形成截流过电压、多次重燃过电压和三相同步截流过电压而损坏设备，特别对电动机，要求配置阻容限压措施；④开断大电流后的触头间在介电强度恢复期中再次出现短时导通的现象，即所谓滑闪现象（也称开断后重燃、再导通、滑相），其机理和影响尚无定论。



真空断路器灭弧室剖面图

利用真空条件灭弧是在 1926 年由米利肯 (Millikan) 和索伦森 (Sorensen) 提出的。随后，美国通用电气公司制造出了真空开关装置，但在其后的一段历史时期中曾发展缓慢，这是因为：①触头被烧熔后释放出大量气体，破坏了真空度；②缺少玻璃或陶瓷件与金属件之间焊接的好方法；③触头材料在真空中关合大电流时出现熔焊，以致失去再分能力。后经以下改进，才使真空断路器得到了很大的发展：①美国通用电气公司赫布 (Hebb) 利用半导体提纯中的 zone-reflecting 方法去除金属中的气体；②采用含镍 (Ni) 28%~29%，钴 (Co) 17%~18%，其余成分为铁 (Fe) 的被称为 Kovar (可伐) 的合金，实现玻璃等与金属件的良好焊接；③采用铜基合金触头材料，内含铋 (Bi)、锑 (Sb)、铅 (Pb)、镉 (Cd)、铬 (Cr)，或它们的混合物，以消除触头合闸熔焊，提高开断次数。真空断路器在美、日、德等许多国家已广为采用，并正在向超高压、大容量方向发展。

中国的真空断路器已作到 10 kV 级, 单断口, 开断电流 16~40 kA; 35 kV 级, 双断口, 开断电流 12 kA。在额定短路开断电流下的连续开断次数已达 30~50 次。

参考书目

李天和著, 大功率开关装置的物理基础与工程应用, 程礼椿等译, 北京: 电力工业出版社, 1982

(曹荣江)

zhenkong jiechuqi

**真空接触器** (vacuum contactor) 利用真空灭弧室灭弧, 用以频繁接通和切断正常工作电流的低压电器。通常用于远距离接通和断开额定电流 150 A 以下的低压线路, 频繁起停 380 V 交流电动机, 调节可变电阻的电阻值等。

真空接触器主要由真空灭弧室和操动机构组成。真空灭弧室具有通过正常工作电流和频繁切断工作电流时可靠灭弧二个作用, 但不能切断过负荷电流和短路电流。操动机构是由带铁芯的吸持线圈和衔铁构成。线圈通电, 吸引衔铁, 接触器闭合; 线圈失电, 接触器断开。吸持线圈一般又有直流和交流两种形式。

中国生产的真空接触器有单极、双极、三极和多极等各种类型。真空接触器除单独使用外, 也可以与熔断器配合使用, 真空接触器用于频繁接通和切断正常工作电流, 而熔断器用于切断过负荷电流和短路电流。

(蓝增廷)

zhendang hui lu shi yan zhan

**振荡回路试验站** (oscillating circuit high power testing station) 利用高压整流电源向电容器充电, 再通过电感释放电容储能, 以形成的工频强电流模拟系统的短路电流, 以电容器上的电压模拟系统的恢复电压, 用以考核高压开关设备的开断与关合能力的大功率试验设施。电容器中的储能有限, 不会使昂贵的被试品受到毁灭性的破坏, 适用于开发性试验。高压整流电源所需功率不大, 不会影响电力系统的正常运行。电容器组可分批扩建, 便于积累资金, 节约投资。振荡回路试验站结构简单, 效益高, 日试验可达百次, 便于进行重复性的研究试验。但振荡回路的衰减大, 等价性较差, 不便于进行三相试验、重合闸试验、长燃弧时间的试验, 也不能进行动、热稳定试验。

振荡回路有单频回路、分压回路、分流回路、分流分压回路以及复合回路等多种运行方式, 也可以利用变压器调整电压。振荡回路还可用作合成试验中的电压源及电流源。

振荡回路专用电容器的工作状态是直流充电交流放电, 每台电容器充电电压幅值为 30 kV, 电容量为 18  $\mu$ F, 充放电次数超过万次。

振荡回路试验站是苏联 A. A. 戈列夫 (A. A. Голєв) 教授发明的。1947 年, 苏联的列宁格勒加里宁工学院 (1989 年改名为列宁格勒国立工业大学) 建成了世界上第一座工业性振荡回路试验站。中国于 1958 年在北京水利电力部技术改进局 (现名为电力科学研究院) 建成了第一座小型试验用振荡回路试验站, 1964 年在西安高压电器研究所建成迄今最大的振荡回路试验站。美国和西欧国家不单独使用振荡回路做大功率试验, 仅将其作为合成试验中的电压源。

(顾霓鸿)

zhengliuce jiaoliu dianwang guzhang

**整流侧交流电网故障** (faults of AC network on rectifier side) 直流输电送端交流系统中发生可能危及人身、设备和供电可靠的非正常运行状态。主要包括三相短路、两相短路、两相对地短路和单相短路以及断线。交流系统中不同地点发生不同方式短路时会使整流站交流母线电压的大小、相位、波形发生不同程度的变化, 使直流输电系统受到不同程度的影响。

若故障引起整流站交流母线电压的变化未超出整流器触发角和换流变压器自动调节分接头的可调范围, 直流输电仍能在整定的直流电压和电流下运行, 仅引起触发角和分接开关位置的变化。

若故障引起整流站交流母线电压变动超出整流侧的可调极限时, 直流电流将因故障而减小, 或由逆变器定电流控制使直流电流维持在定减额电流值运行, 或采取特殊的故障控制方式运行, 例如利用直流输电控制实现阻尼交流系统振荡和实现低电压减电流控制等。实现特殊故障控制时, 一般应考虑发生故障的送端交流系统的需要、维持直流输电稳定运行的需要和受端交流系统的承受能力。

当故障使整流站交流母线电压降低很多时, 导致控制调节器的基准信号消失或因阀中储能不足, 未能实现换流阀的触发, 由相应的保护动作, 直流输电系统将因此而停运。当故障被隔离或消失后, 交流母线电压恢复到一定程度时, 直流系统将自动恢复运行。

交流电网的不对称故障和复合故障的电磁暂态过程, 会使整流站交流母线的三相线电压发生不对称变化、波形畸变以及线电压过零点时序的混乱。但在控制系统中采取合适的处理之后, 这些扰动和影响将被减弱或排除。

(赵礼生)

zhengbianhuan guodianya

正变换过电压 (direct transfer overvoltage)

见配电变压器防雷。

zhizhu jueyuanzi

支柱绝缘子 (post-type insulator)

刚性地固定在构架上用以支持带电导体或设备的绝缘子。按其外形结构不同,主要分为棒形支柱绝缘子和针式支柱绝缘子两类,前者属于不可击穿类绝缘子,后者属于可击穿类绝缘子。按其使用条件不同,又可分为户内式和户外式两类。此外,还有一种盘形支柱绝缘子,现已基本淘汰不用。

棒形支柱绝缘子 由实心的圆柱棒形绝缘件和两端的连接金具组成的支柱绝缘子。其绝缘件由电工陶瓷或钢化玻璃制成。绝缘件表面设有伞(裙)或棱,以提高沿表面闪络电压。金具通常是连接相同类型的棒形支柱绝缘子或固定带电导体用的法兰。金具与绝缘件之间用高强度水泥或其他粘合剂胶装成一个整体(见图1)。户外式棒形支柱绝缘子的伞(裙)比较宽大,而户内式的则只有棱而无伞(裙)。

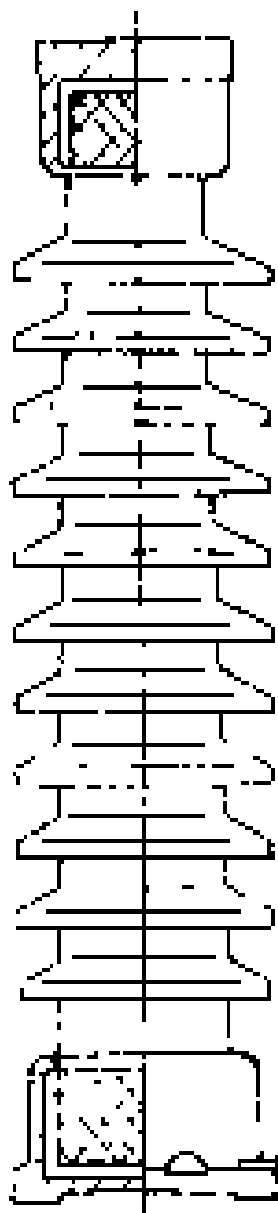


图1 棒形支柱绝缘子

柱绝缘子

棒形支柱绝缘子的试验项目有:工频干、湿耐受电压试验,雷电全波冲击耐受电压试验等电气性能试验,以及抗拉、抗压、抗弯曲和抗扭转等机械性能试验。

针式支柱绝缘子 由伞形绝缘件、针形脚和帽形法兰组成的支柱绝缘子。其绝缘件的表面大致与电场的等位面重合。由多层绝缘件组成的针式绝缘子,要求各层的电压分布与每层的耐受电压相适应。由于极间的距离远小于沿表面的闪络距离,针式支柱绝缘子属于可击穿类绝缘子,它的电压等级较低,一般在35kV及以下。

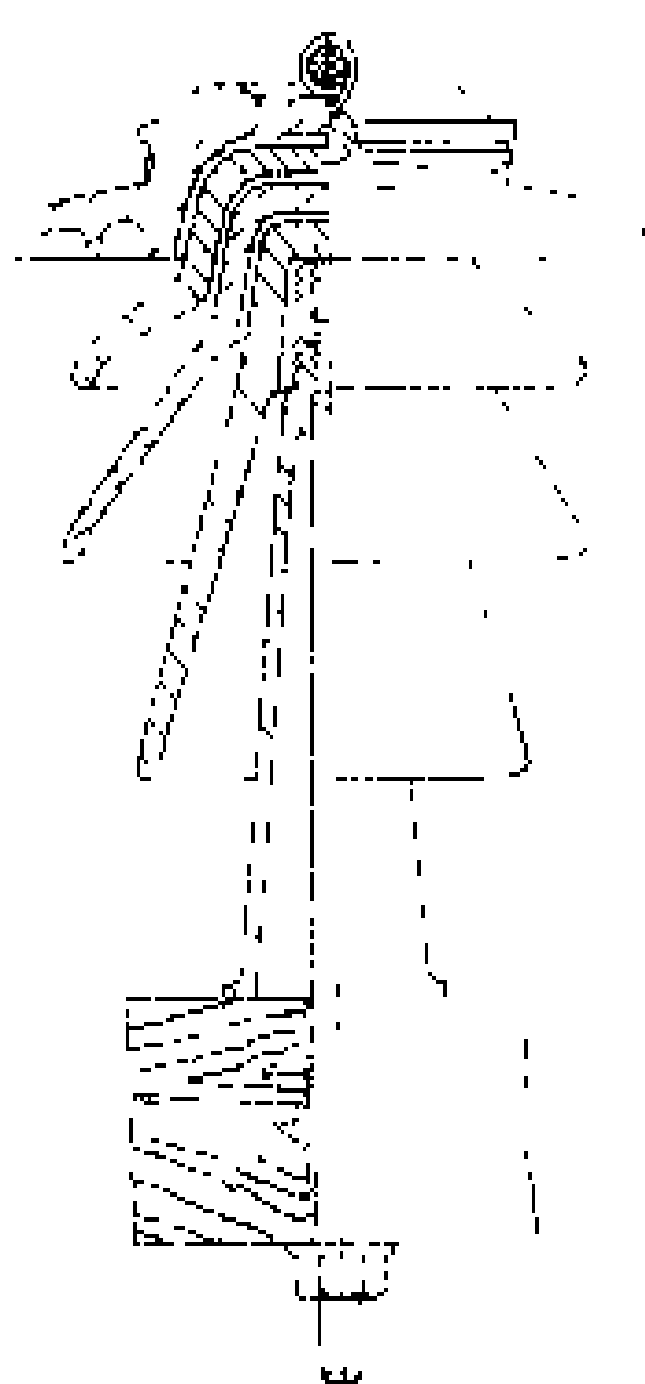


图2 电站户外针式支柱绝缘子

低压的针式支柱绝缘子常用于通信线路和低压配电线路。电站户外针式支柱绝缘子(见图2),在电压等级高于35kV时,可将多个

绝缘子叠装使用。

由于针式支柱绝缘子是可击穿类绝缘子,它除了要进行棒形支柱绝缘子的所有试验外,尚需进行击穿电压试验。

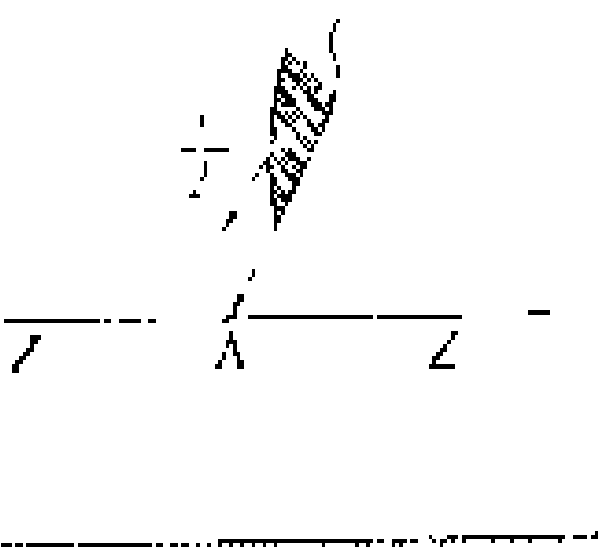
(郑健超)

zhijilei guodianya

直击雷过电压 (direct stroke lightning overvoltage)

雷电直击于导线或电气设备时在导线或电气设备上产生的过电压。

雷直击于输电线路的导线时(如图中A点),近似等于沿主放电通道袭来一个*i*/2的电流波,由于雷击输电线路后,电流波将向线路的两侧流动,导线被击点A点的过电压 $u_A \approx \frac{iZ}{4}$ ,式中*Z*为导线的波阻抗。取*Z*为400Ω,则当*i*=30kA时,过电压可高达 $u_A=3000$ kV。



雷直击于输电线路的导线

雷直击于另一端接地的有限长导体(例如雷击于避雷针的顶部)时,被击点A点的过电压 $u_A = L_0 h di/dt + ir + iR$ 。式中*L*<sub>0</sub>为被击导体每米长的电感,一般可取*L*<sub>0</sub>=1.67μH/m;*h*为被击点的高度,m;*r*为被击导体每米长的电阻,Ω;*R*为接地电阻,Ω。当被击避雷针的高度*h*为20m,针的截面为50mm<sup>2</sup>,材料为钢,则*r*=3.4×10<sup>-3</sup>Ω。取接地电阻*R*=10Ω,*i*=100kA,则避雷针上的直击雷过电压可达2282kV。

雷直击于电气设备时,如果电气设备无避雷器保护,则由上两例可推知,会出现极高的过电压使电气设备绝缘损坏。因此电气设备必须并联避雷器以限制直击雷过电压。装有避雷器保护的电气设备所受直击雷过电压的值由避雷器的冲击放电电压及残压决定。

(解广润)

zhi liu dianlan

直流电缆 (direct current cable)

用于直流输配电系统中的电力电缆。直流电缆除了运行的电气特性与交流的不同,其结构和交流电缆基本相同。直流电缆主要用在长距离的海底电缆线路。

直流输配电系统通常是二线(正、负极)运行,因此直流电缆一般为单芯电缆。因为直流电缆的导体没有集肤效应和邻近效应,即使输送很大电流,也不必采用复杂的分割导体结构。直流电缆的绝缘可以和油浸纸绝缘电缆、固体挤压聚合电缆、自容式充油电缆、充



气电缆的绝缘相同,而铠装层因不受导体电流的影响,不需考虑铠装层的损耗和降低铠装层电阻率的措施。

交流电缆的最大场强总是在导体表面紧靠绝缘层处,而直流电缆的电场强度是按绝缘的电阻系数成正比分配的,绝缘的电阻系数是随温度而变化的,即绝缘层中的最大电场强度不仅与外加电压有关,而且与负载有关。当无负载时,最大电场强度在电缆导体的表面。当负载增大时,因靠近导体处温度较高,绝缘电阻系数降低,则导体表面的电场强度减少,而绝缘表面的电场强度逐渐增加。因此直流电缆允许的最大负载不应使绝缘表面的电场强度超过其允许值,即不仅要考虑电缆的最高工作温度,而且还要考虑绝缘层的温度分布。

直流电缆的另一特点是绝缘必须能承受快速的极性转换。在带负荷的情况下极性转换会引起绝缘内电场强度的增加,通常增加 50%~70%。

1880 年爱迪生在纽约城用铜棒绕包麻带穿在铸铁管中浇注沥青后作为配电照明用,是最早的直流电缆。其后交流系统发展,直流配电基本终止,世界各国均致力于发展适用在交流输配电的电缆技术。随着交流电缆不断地改进,在 20 世纪 50 年代初又发现远距离输电需要采用直流电缆,至此直流电缆又得到应用。目前直流电缆的最高工作电压已达到±500 kV。

参见彩图插页第 29 页 93 图。

参考书目

郑肇骥,王焜明主编.高压电缆线路.北京:水利电力出版社,1983  
 刘子玉.电气绝缘结构设计原理.北京:机械工业出版社,1981

(桑纪明)

zhiliu dianlan xianlu

**直流电缆线路** (DC cable line) 利用直流电缆输送电力的直流线路。一般用于不能或不宜采用直流架空线路的场合,例如跨越海峡给海岛送电、向大城市中心供电等。直流电缆线路的电参数主要有:导体电阻和电抗、金属护套和加强层的电阻、电缆的芯线间及对地电容等。(见直流线路电参数)

必须采用电缆线路送电往往是选用直流输电方式的理由之一,其主要原因是:①由于绝缘层内的电场分布、电缆内的发热情况等方面的差异,电力电缆在直流电压作用下的绝缘强度几乎等于交流电压下的 3 倍或更大,所以电缆在直流下的工作电压可比交流输电时高得多,输电容量亦相应增大。又由于电缆本身的造价十分昂贵,所以只要电缆线路达到一定长度,采用直流输电方式在经济上就比较合算。②电缆的电容要比架

空线大得多,因而在交流下会出现较大的电容电流。当需要敷设的电缆长度超过一定数值(例如 40 km)时,如果采用交流输电方式,就会出现电容电流占用电缆芯线全部有效负载能力的情况。而采用直流输电方式,其稳态电容电流仅是由纹波电压引起的,数值很小,电缆的送电长度几乎不受电容电流的限制。

实际使用的高压直流电缆有粘性浸渍纸绝缘电缆、充油电缆、充气电缆、固体挤压聚合电缆等类型。当额定电压超过 250 kV 时,大多采用充油电缆。

直流电缆本身的结构与交流电缆基本相似,但其终端套管的选择原则与交流电缆有所不同:由于直流输电系统内的操作过电压水平较低,直流电缆终端套管在直流作用下表面积污较严重,其表面泄漏距离通常均取决于直流工作电压的要求。由于污染后的闪络电压降低较多,因而直流电缆终端套管应尽可能选用直流耐污型外瓷套,且其爬电比距亦应选得较大,例如:洁净区约 2.2 cm/kV,一般污秽区为 4.0 cm/kV,严重污秽区则为 5.2~7.0 cm/kV。

世界上已投运的直流电缆线路绝大多数为海底电缆。直流海底电缆的敷设要求与方法、路径选择、对敷缆船的技术要求等基本上均与交流海底电缆相同。(见海底电缆敷设)

参考书目

戴熙杰主编.直流输电基础.北京:水利电力出版社,1990

(郑德明)

zhiliu dianliu huganqi

**直流电流互感器** (DC current transformer)

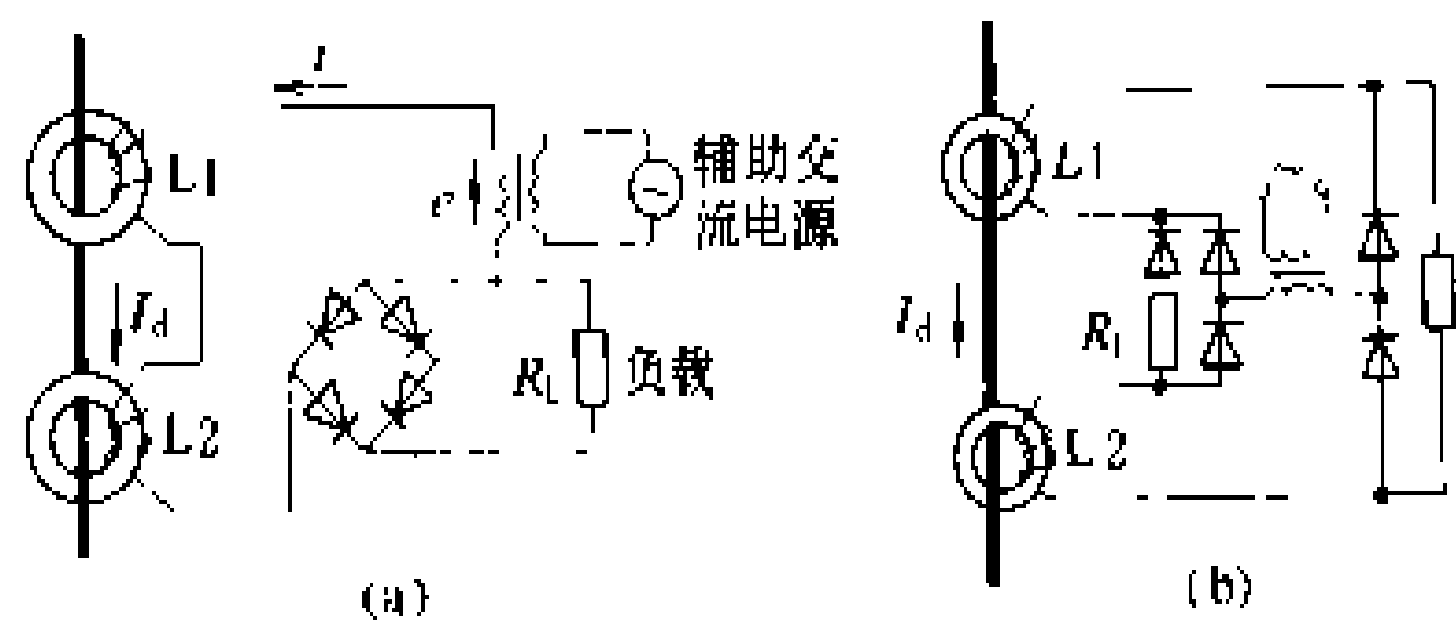
用于测量高压直流电流的信号转换装置。它的输出信号一般是低电压的直流电压或电流,并与被测的高压直流电流成正比。其输出电路与被测的高压直流主回路绝缘,以保证安全。输出回路与被测回路之间还有静电屏蔽层,以免受到高电压大电流的高频电磁干扰。它具有较高的转换与测量精度和较快的响应速度。

直流电流互感器有电磁型和光传输型两类。电磁型直流电流互感器通常由饱和电抗器构成,又有串联型和并联型两种。图示为电磁型直流电流互感器的原理接线图。光传输型直流电流互感器通常由处于高电位的电流检测、光缆传输和光电转换等环节构成。

大多数已建成的直流输电工程采用电磁型直流电流互感器,其工作原理与磁放大器相似。其中串联型由两个相同的饱和电抗器 L1 和 L2 组成。二次电流或电压信号与一次电流成正比,但输出电流或电压波形每半周有一个小缺口。并联型也由两个饱和电抗器组成,其二次绕组是并联的,输出电流波形中的小缺口将减



小以至消除,并且它的性能也较好,但对反向直流电流具有不同的响应特性。不过被测主电路的换流阀也是单向导电的,并联型直流电流互感器可以与主电路配合好,不影响转换与测量功能的实现。



电磁型直流电流互感器的原理接线图  
(a) 串联型; (b) 并联型

直流电流互感器的主要性能为:测量精度一般为0.5~1.5级,响应时间为50~100 μs,一次电流小于10%的额定值时不正确响应为0.5%~3%。

直流电流互感器主要用于高压直流输电工程的控制和保护系统。由于光传输型直流电流互感器在高电压绝缘和抗电磁干扰方面有无可比拟的优越性,故将成为今后发展的方向。

参见彩图插页第35页108图。

(王传佑)

zhiliu dianya huganqi

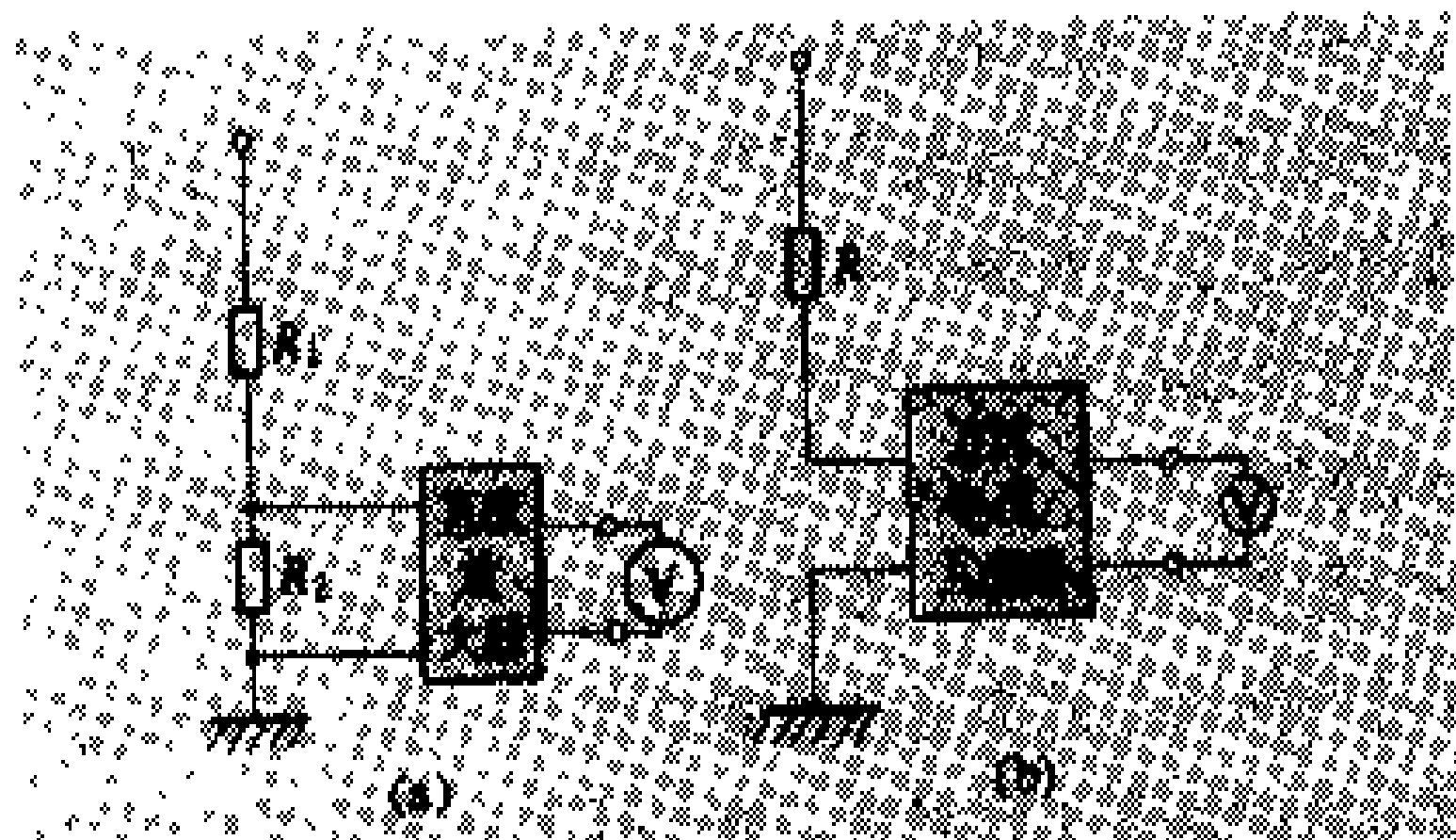
**直流电压互感器** (DC potential transformer)

用于测量直流高电压的信号转换装置。其输出信号是低压直流电压,与被测的直流高电压成正比。输出电路与高压直流主回路绝缘,两者之间还有静电屏蔽层,以保证安全和减小干扰。直流电压互感器用于高压直流输电控制和保护系统,它具有较高的测量精度和较快的响应速度。

直流电压互感器按其工作原理分为电压型和电流型两类。

电压型直流电压互感器由分压器和直流放大器组成,其原理示意如图(a)所示。分压器由高压单元和低压单元组成,图中分别以电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 表示。低压单元上的电压经放大器处理后输出。电压型直流电压互感器的放大器有磁放大器、电放大器和光放大器三类。磁放大器通常采用推挽式的,以保证被测电压为正值、负值和零值时都具有足够的精度,其误差为0.5%~1.5%,响应时间为1~100 ms。电放大器通常为电子调频放大器,其误差一般为0.5%~1.5%,响应时间小于100 μs。光放大器有光电隔离放大器和光纤光电耦合数据采集两种,能达到较高的精度和较快的响应速度,可根据需要选择。光纤光电耦合方式还具有很强的抗电磁干扰能力,是今后发展方向。

电流型直流电压互感器由直流电流互感器与高电阻 $R$ 串联构成,其原理示意如图(b)所示。电流互感器所测得的电流可精确表示出直流高电压,其响应速度快,响应时间约为50~100 μs,可靠性也很高。



直流电压互感器原理示意图  
(a) 电压型; (b) 电流型

(王传佑)

zhiliu dianya shiyan

**直流电压试验** (tests with direct voltage)

检验交、直流电力设备及绝缘材料在直流电压作用下的绝缘强度及其它电气特性的试验。它主要用于考核直流输电及换流站设备的绝缘水平,在许多情况下也用于交流设备的绝缘试验。

按照不同的试验目的,直流电压试验分为额定耐受电压试验、破坏性放电试验、泄漏电流试验、局部放电试验和极性翻转试验五种。按照被试品外绝缘的表面状态不同,直流电压试验又分为干试验、湿试验及人工污秽试验三种。

由于直流电压下只有阻性电流流过被试品,避免了交流电压下的电容电流,可大大减小试验设备的容量。同时,由于直流电压对绝缘的破坏作用小,因此可使用较高的试验电压并测量泄漏电流,以有效地发现尚未完全贯穿的集中性绝缘缺陷。电容量较大的交流电力设备,如电力电缆、电机设备、电容器等也常用直流电压进行试验。但直流电压下绝缘内的电压分布与交流电压下的不完全相同,不如交流电压试验更接近交流电力设备的实际情况。

**试验设备** 试验电压一般用整流装置产生(见直流高压发生器)。要求被试品上电压的脉动系数不大于3%。选择试验设备容量时应计及被试品的泄漏电流、吸收电流和内、外部的局部放电电流。内绝缘试验和干试验时,电流通常很小;湿试验时,泄漏电流可达数十毫安;人工污秽试验时预放电电流可达几百毫安甚至1~2 A。此时,通常要求电源的动态压降不超过10%,否则会影响试验的准确性。

**试验方法** 额定耐受电压试验、破坏性放电试验及局部放电试验与交流电压下同类型试验的方法相

同。(见交流电压试验、局部放电试验)

泄漏电流试验是测量一定直流电压下流过被试绝缘的持续电流,它可以有效地发现绝缘内部的缺陷。通常,泄漏电流的测量与直流耐压试验同时进行,有时也在降低电压下单独进行。泄漏电流用毫安表或微安表测量,为免除电场干扰及引线电晕电流的影响,表计需屏蔽并尽量靠近被试品的高压端或接地端放置。

极性翻转试验是用来检验电源极性变化时直流设备绝缘的承受能力。试验的方法是对被试设备施加超过其额定电压的某一极性的直流电压数十分钟后,再于数分钟内转换成另一种极性的直流电压并持续数十分钟。近年来,这种试验已被某些国家正式采用。

直流电压下的外绝缘试验需进行大气条件修正和海拔修正。(见高压电力设备绝缘试验)

参考书目

日本电气学会绝缘试验方法手册修订委员会编,绝缘试验方法手册,修订版,陈琴生译,北京:水利电力出版社,1987

(王如璋)

zhi liu duan lu qi

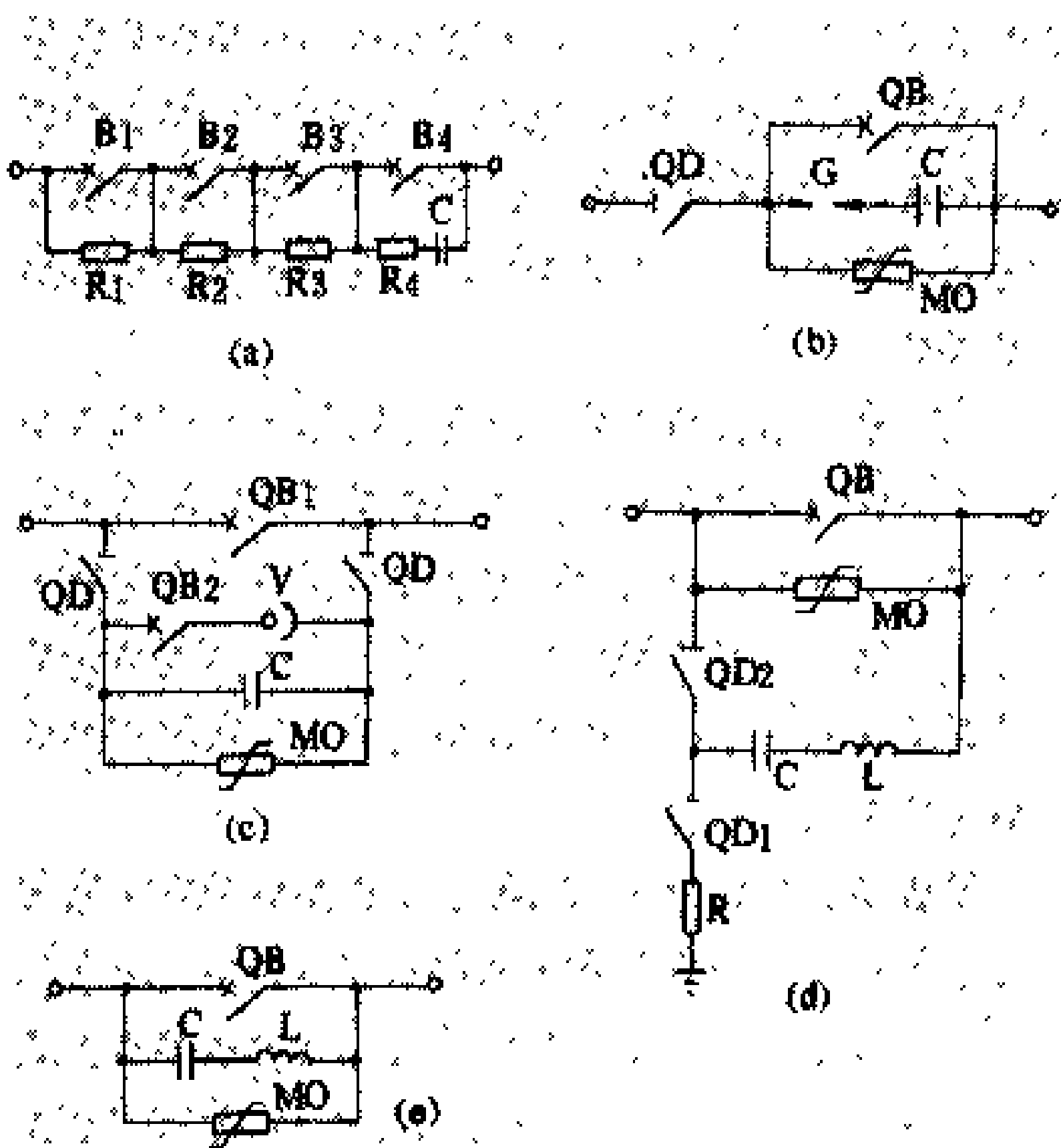
直流断路器 (direct current breakers)

能够按照直流输电的直流部分运行方式及事故处理的要求合上或断开直流负荷电流和故障电流的开关设备。直流断路器的任务:①在正常运行状态下,投入或切除直流线路或换流器而不必降低直流电压。②当直流系统发生故障需要切除故障部分时,直流断路器可与控制系统配合,切断故障电流。直流系统的故障电流在电流调节器的快速作用下,一般很快即降到其整定值。因此,直流断路器切断的故障电流比交流断路器要小得多。③直流断路器还可用于在运行中进行直流侧接线方式转换的开关,如单极大地回线方式和金属回线方式相互转换时所用的金属回线转换断路器(MRTB)和金属回线转换开关(MRTS)。随着直流输电系统规模的增大,多端直流输电系统的出现,直流断路器的应用将会更加广泛。

直流断路器的研制有三个难点:①直流电流无过零点,灭弧困难。②平波电抗器和直流架空线路纵向的电感比较大,直流线路横向电容也不小,加在极线的电压一般达到额定值左右,要求直流断路器在分闸断流过程中耗散直流主电路中所储存的很大能量。③直流系统要求的操作过电压比交流系统的低。直流断路器一般由转换开关、转换电路和耗能器三部分组成。分闸时,电流先从转换开关转移到转换电路,然后转入耗能器耗散能量以实现灭弧。转换开关采用过少油断路器、真空断路器、六氟化硫断路器及空气断路器等交流断

路器,还采用过磁控放电管。

按照灭弧方式的不同,直流断路器分为叠加振荡电流方式和耗能抑流方式两大类,又可细分为六种方式:①分段串入电阻耗能抑流方式。如图(a)所示,多断口断路器的断口B1~B4相继断开,使串入主电路



高压直流断路器的典型原理电路示意图

(a) 分段串入电阻耗能抑流方式; (b) 金属氧化物耗能抑流方式; (c) 磁控放电管耗能断流方式; (d) 有源型叠加振荡电流方式; (e) 无源型叠加振荡电流方式

的电阻逐步增大,相应地使直流电流逐步减小,由最后一个断口断开电流。②金属氧化物耗能降流方式。如图(b)所示,当交流断路器QB的触头分开时,由于电弧压降使触头间的电压升高,将火花间隙G击穿,电流转入电容C使其充电。电压越升高,通过金属氧化物元件MO的电流增加得越快,使能量得以耗散,从而续流回降到极其微小的漏电流,此时即可视为直流电流被断开。③磁控放电管耗能断流方式。如图(c)所示,交流断路器QB1的触头分开,由于极间的电弧压降使电流转移至磁控放电管V,接着将交流断路器QB2分闸,当触头完全分开后,给磁控放电管加上正交磁场,使其中电流中断,而将电流转移至电容器C支路,再转移入MO。④有源型叠加振荡电流方式。如图(d)所示,正常运行时通过高电阻R将电容器C充电至线路电压,欲分闸时,断开QD1,合上QD2,电容中储存的电荷通过电感L放电产生振荡电流,紧接着断开断路器QB,等待线路直流电流叠加上振荡电流而形成电流的人工过零时刻来到而遮断。⑤无源型叠加振荡电流方式。如图(e)所示,利用电弧电压随电流增大而下降的非线性负电阻效应,在与断弧间隙并联的LC串联回路中,产生发散的自激振荡,使正处

于电弧间隙中将被开断的直流电流叠加上增幅的振荡电流,当总电流过零时而实现遮断。⑥拉长电弧耗能断流方式。这种特殊断路器的灭弧腔内壁具有较深的螺纹形槽,可供旋转的动触头离开静触头之后在槽中作螺纹形运动,同时也借助于电弧自身的电动力,在槽内把电弧拉成螺纹形的长弧,并使电弧与灭弧腔的槽形内壁接触,起到冷却绝缘介质和去游离的作用,以耗散电弧能量,从而遮断电流。在六种方式之中,以金属氧化物耗能降流方式较为简单可靠,无源型叠加振荡电流方式次之。

按照绝缘结构的不同,直流断路器分为空气绝缘和六氟化硫气体绝缘两类。空气绝缘直流断路器的转换电路的电容器、电抗器和耗能器等设备装在绝缘平台上。六氟化硫气体绝缘的直流断路器采用气体绝缘金属封闭电器的结构,所有设备均装设在密闭充气的金属容器中。

世界各国已研制成功的高压直流断路器的主要技术参数为:①金属氧化物耗能降流方式的有190 kV、1000 A,80 kV、2500 A;②磁控放电管耗能断流方式的有100 kV、1000 A,80 kV、2160 A;③有源型叠加振荡电流方式的有80 kV、5000 A,250 kV、8000 A;④无源型叠加振荡电流方式的有15 kV、1200 A,500 kV、2200 A,振荡频率一般为1.8~7 kHz。目前,直流断路器的最高电压达500 kV,电流达10 kA,耗散及吸收能量达75 MJ。金属氧化物避雷器的开发应用为直流断路器的研制创造了有利条件。交流断路器单断口电压水平、遮断能力的提高也有利于更高电压直流断路器的开发。在两端直流输电系统中,高压直流断路器已普遍用于大地回流方式与金属回流方式的转换开关。随着多端直流输电系统的发展,用于遮断故障电流的直流断路器将为一些实际工程所采用。

(鲍敏铎)

zhiliu gaodianya fashengqi

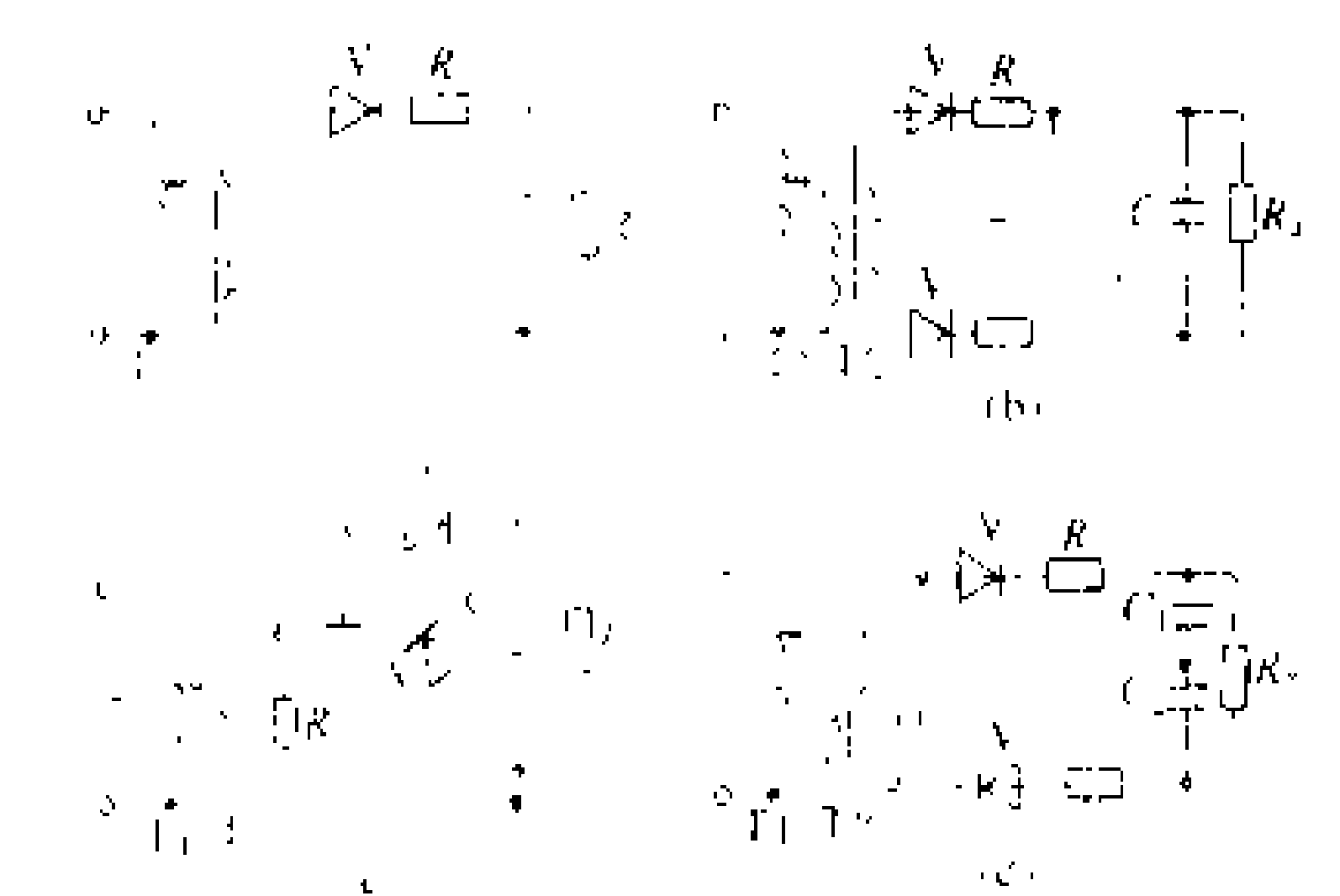
**直流高压发生器** (high voltage DC generator) 产生直流高电压的试验装置。主要用于研究直流输电及换流站设备和绝缘材料在直流高电压下的绝缘强度、直流输电线路电晕和离子流及其效应以及进行交直流电力设备的泄漏电流试验。一些容量较大的交流设备,如电力电缆、电容器等,也常应用直流高压发生器进行绝缘试验,以减小对试验设备容量的要求。直流高压发生器还可作为其它高压试验设备如冲击电压发生器、冲击电流发生器、振荡回路(见振荡回路试验站)等的电源。在其它科技领域里也被广泛应用。

高电压实验室中通常用将交流高电压整流的办法

产生直流高电压。整流电路主要有简单整流电路和串级整流电路,其基本要求是:①输出电压的脉动系数应不大于3%;②一旦被试品发生闪络,电源应能够维持电弧使它不熄灭。

直流高压发生器的特性用额定直流电流(平均值) $I_d$ 、相应的输出电压(平均值) $U_d$ 和电压脉动系数 $S$ 表示。 $S = (U_{max} - U_{min}) / (2U_d)$ ,式中 $U_{max}$ 、 $U_{min}$ 分别是输出电压的最大值和最小值。

**简单整流电路** 高电压实验室内应用最广泛的基本整流电路如图所示。空载时,半波整流电路的输出电压等于变压器输出交流电压的最大值 $U_m$ ,两种倍压整流电路的输出电压都等于2倍交流电压最大值,即 $2U_m$ 。负载时,输出电压降低,并发生脉动。用全波整流电路可以获得较大的输出电流,或者在同样输出电流下,电压的脉动系数较小。



几种常见的简单整流电路图  
(a) 半波整流; (b) 全波整流; (c) 倍压整流 (一);  
(d) 倍压整流 (二)

T1—调压器; T2—试验变压器; V—硅堆; C—滤波电容器; R—保护电阻;  $R_2$ —负载电阻

**串级直流高压发生器** 将图中(c)或(d)所示的倍压整流电路 $n$ 级串联起来,空载时输出电压可达 $2nU_m$ 。以图(d)为基础的串级直流高压发生器输出电流比较大,但需要用特制的绝缘铁芯变压器充电。以图(c)为基础的串级直流高压发生器应用更为广泛。负载时,串级直流高压发生器的电压降落和电压脉动都随级数的增加而急剧增加,因此,串级的级数通常不超过5级。为得到较大的输出电流,可以用提高电源频率的办法,也可以用对称回路或三相回路的串级直流高压发生器。目前,串级直流高压发生器的电压已做到2 MV。

**高压硅堆** 高压整流电路中将交流转换成直流的关键元件是高压硅堆,一般是由多个硅二极管串联组成。通常用额定整流电流、正向压降、额定反峰电压等参数表示它的特征。它体积小,重量轻,寿命长,使用简便,无辐射,普遍应用于直流高压发生器中。由于对

地杂散电容的影响,使串联的每个硅二极管上的电压分布不均匀,从而限制了高压硅堆反峰电压的提高。提高硅二极管的反峰电压并相应地减少串联的硅二极管的个数,并采取强迫均压的措施,可以进一步提高高压硅堆的反峰电压。

直流高压也可由静电发生器产生,它的特点是波形稳定度高,但容量小,电力产品的绝缘试验中很少应用。

参见彩图插页第43页128图。

参考书目

张仁豫等,高电压试验技术,北京:清华大学出版社,1982

(王如璋)

zhiliu jiakong xianlu

**直流架空线路** (DC overhead line) 采用架空线输送电力的直流线路。它由架设在空气中的导线、避雷线、线路绝缘子、杆塔、金具以及它们所形成的空气间隙和杆塔接地装置等部分组成。按结构和架线方式的不同,直流架空线路可分为①单极线路:杆塔上只有一极导线 [见图1(a)];②同极线路:杆塔上有两根同极性的导线 [见图1(b)];③双极线路:杆塔上有两根不同极性的导线 [见图1(c)]。单极线路和同极线路一般以大地或海水作为回流电路,其电流与极导线中的电流相同。双极线路在正常运行时,只有很小的两极不平衡电流流过回流电路,而在一极发生故障退出运行时,另一健全极仍可利用回流电路继续运行,但要求回流电路的接地电极能在重载之下运行。如果一个极的换流器发生故障,它的线路导线经切换,也可以作为健全极的金属回流电路运行,以减轻接地电极的负担。

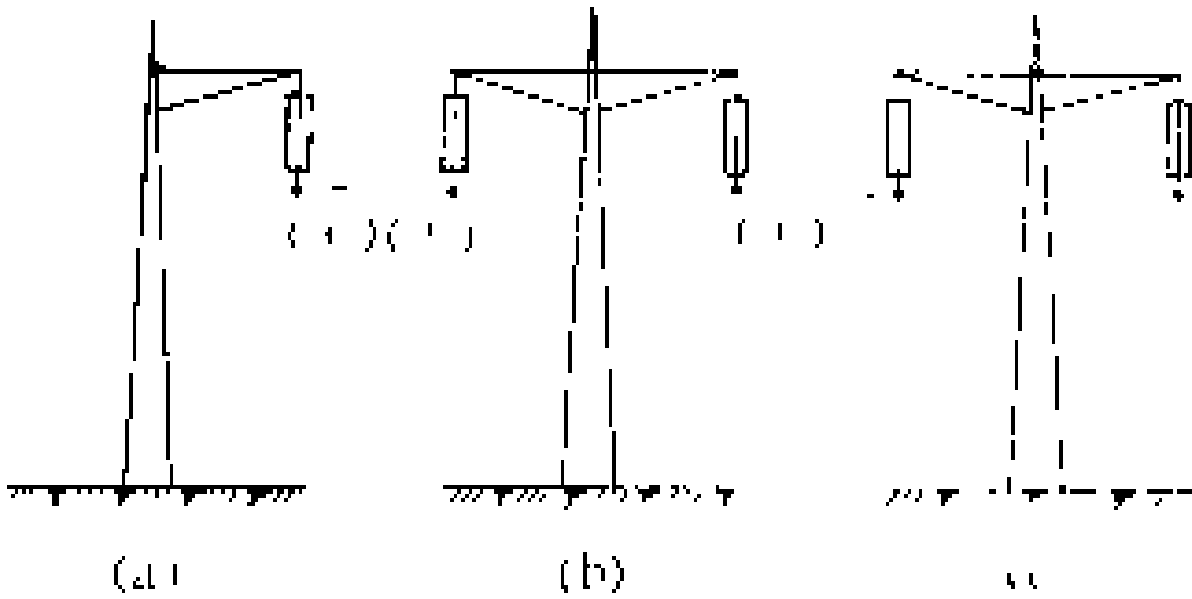


图1 直流架空线路

(a) 单极线路; (b) 同极线路; (c) 双极线路

直流架空线路具有一系列与交流架空线路不同的特点,主要表现在超高压直流架空线上的直流电晕及其派生效应、直流线路绝缘子的结构与运行特性、直流架空线路的耐雷性能与绝缘配合、直流架空线路的杆塔结构等方面。

导线与避雷线 直流架空线路的导线截面积亦按

经济电流密度选定,然后再根据适当减小电晕及其派生效应的要求,选择采用单导线还是分裂导线,以及分裂导线的分裂数、分裂间距、导线直径等参数。

影响超高压直流架空线路导线选择的电晕派生效应主要有:电晕损耗、电晕无线电干扰、电视干扰、可听噪声等。(见直流输电环境电磁)

避雷线在直流架空线的防雷保护中起着首要的作用。导线与避雷线在档距中的最小距离、避雷线规格与导线规格的配合等,均与交流线路的相同。

线路绝缘子 直流线路绝缘子的工作条件和技术要求与交流线路绝缘子是有差别的,其主要特点是集尘效应强、污闪电压低、老化快、钢脚的电腐蚀严重等。由于这些特点,性能良好的交流绝缘子不一定就是好的直流绝缘子。由于直流绝缘子更易受到污染,污染后的闪络电压也降低得更多,所以直流绝缘子的结构型式一般均采用耐污型,即具有较长的表面泄漏距离,以利子缩短绝缘子串的总长度。研究工作表明:理想的直流绝缘子的泄漏距离 $l$ 与其高度 $H$ 的比值( $l/H$ )范围

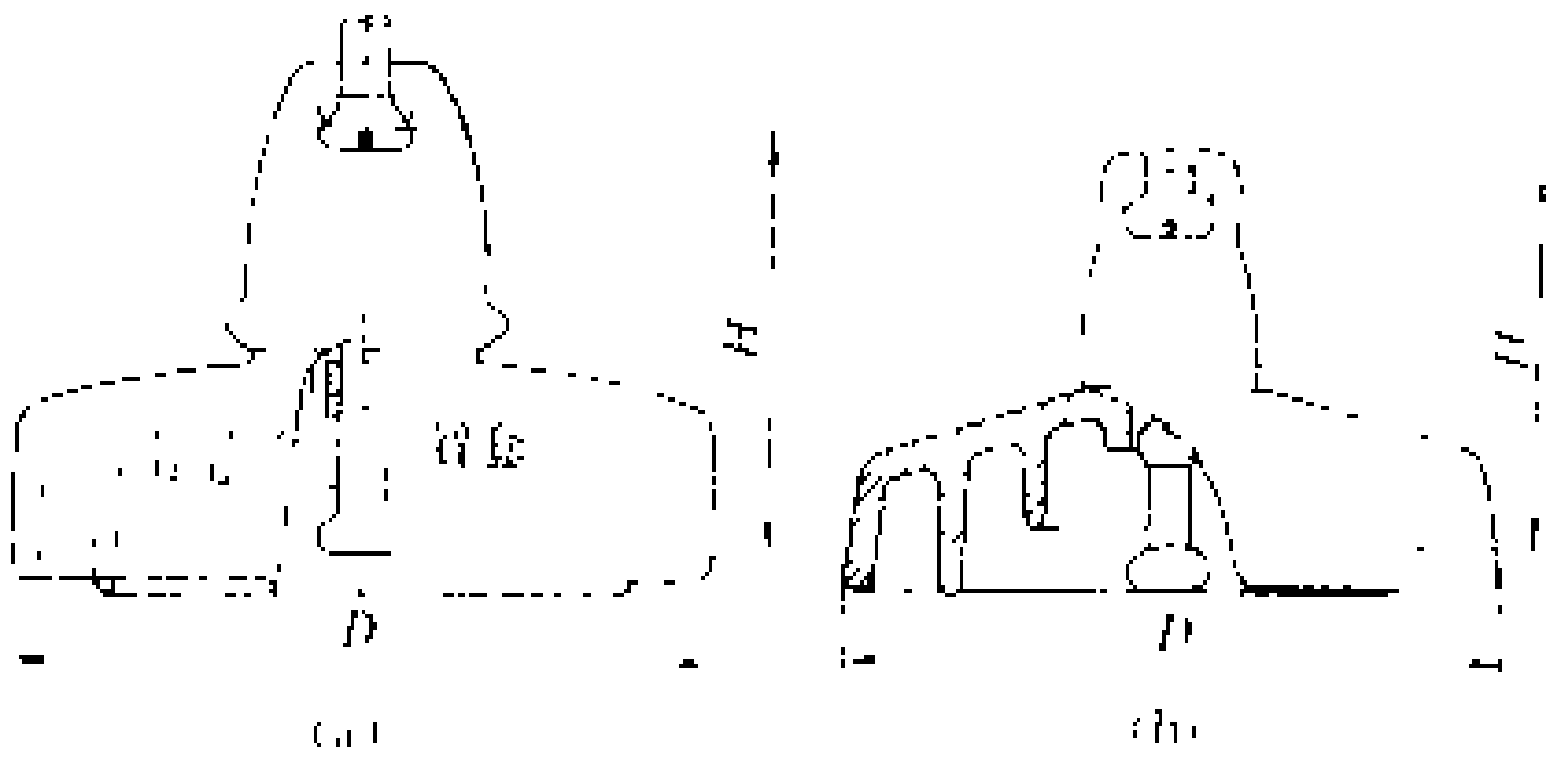


图2 直流线路绝缘子  
(a) 瓷绝缘子; (b) 玻璃绝缘子

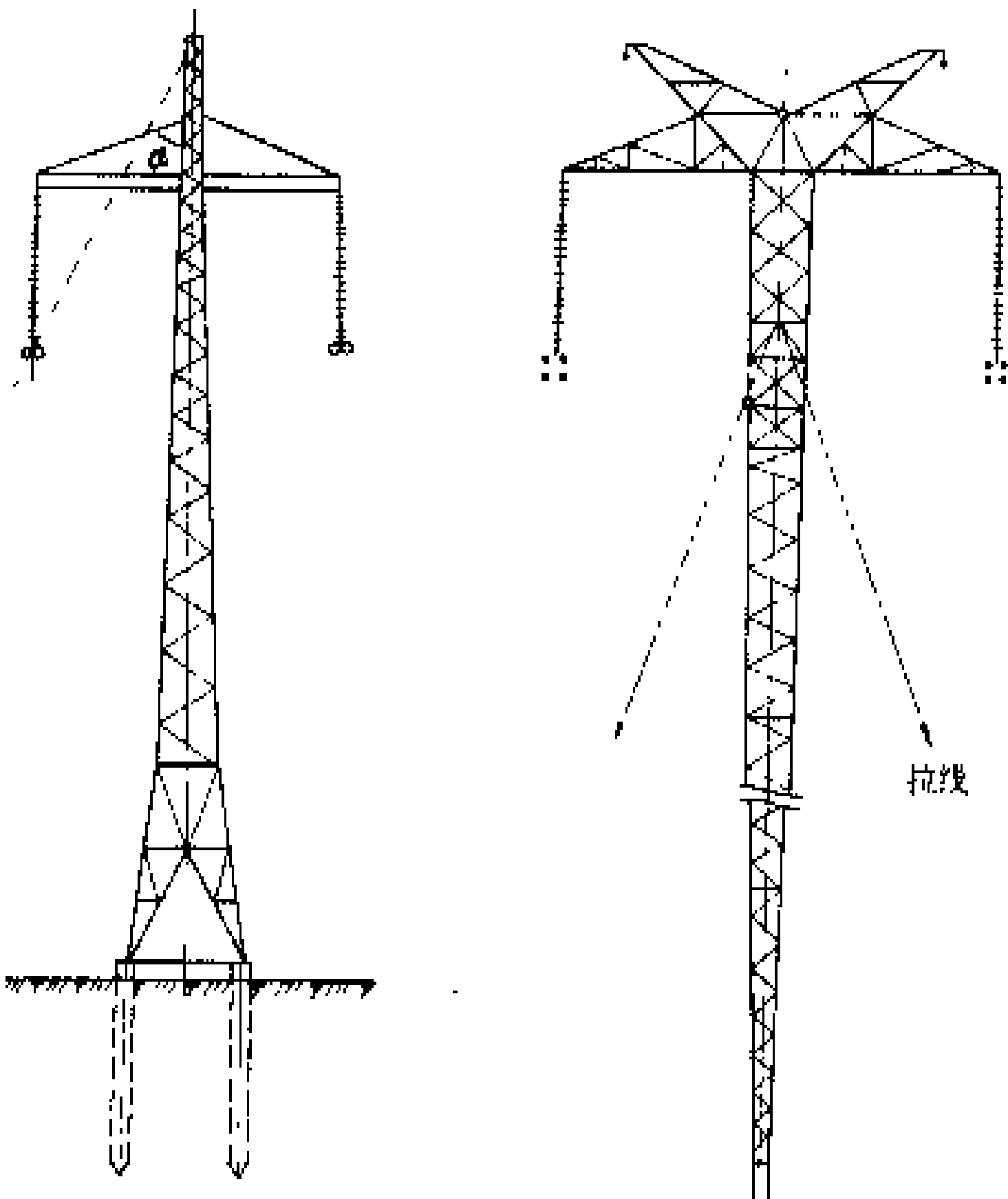


图3 双极直流架空线路的直线塔  
(a) T型单柱自立杆塔;  
(b) 单柱双避雷线带拉线杆塔

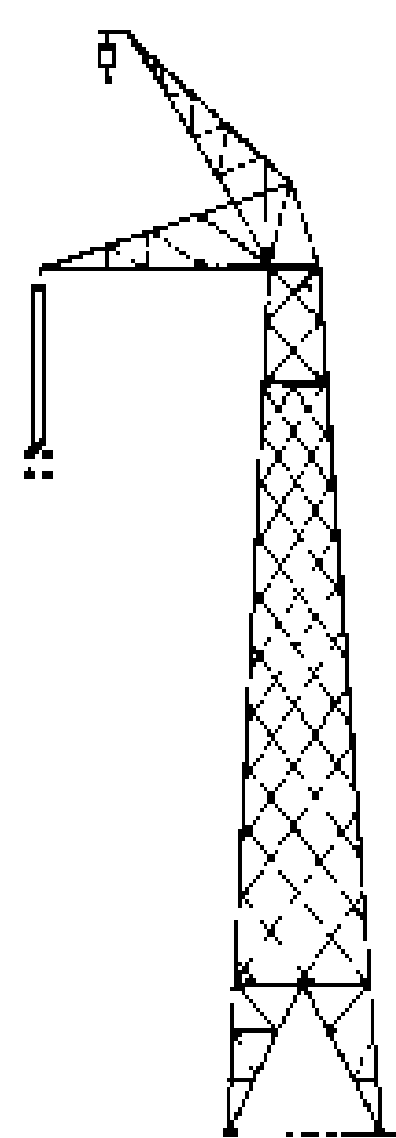


图4 单极直流架空线路的杆塔

直流输电工程所采用的533 kV单极杆塔,水平横担上悬挂一极导线,向上倾斜的横担则用来悬挂避雷线。

参见彩图插页第37页114图。

#### 参考书目

戴熙杰主编, 直流输电基础, 北京: 水利电力出版社, 1990

[新西兰]阿律莱加, 高压直流输电, 任震等译, 重庆: 重庆大学出版社, 1987

(Arrillage J. High Voltage Direct Current Transmission. IEE Publication. Power Engineering Series Vol. 6, 1983)

(姚茂生 赵智大)

zhihu shudian

### 直流输电 (direct current transmission)

以直流方式实现电能传输的技术。直流输电与交流电力系统相互配合,发挥各自特长,成为当代电力系统中的一个有特殊作用的环节。直流输电在技术上得到不断更新和发展,它的应用具有广阔的前景。

直流输电近年来在世界上得到迅速发展,到1990年已有42项工程建成,总容量达30 GW左右。其中在中国相继建成了100 kV、500 A 舟山海底电缆送电实验性工程和±500 kV 葛洲坝—上海直流输电工程。估计今后10年内全球直流输电的总容量将达到50 GW以上。

现代直流输电采取交流-直流-交流的换流方式,即送端交流电经整流成为直流电,通过直流输电线路送到受端,再经逆变又转换为交流电供使用。直流输电换流器一般用晶闸管阀(也曾称可控硅阀)构成三相桥式换流电路,也称换流桥。一个换流桥加上配套的换流变压器、控制系统、过电压和过电流保护、开关设备及其他辅助设备构成六脉动(也称六脉波)换流单元。两

个相位差30°基波电角度的六脉动换流桥组成为十二脉动换流单元。若干个换流单元加上配套的平波电抗器、交直流侧谐波滤波器、单元之间的控制以及其他辅助的技术设施成为换流站。换流站接于直流线路的两端成为两端直流输电系统。当今,直流输电系统的构成方式已开始从两端发展为多端。整流和逆变两套换流设备合建在一个站内,则成为两个交流系统之间的背靠背直流耦合系统。

直流输电的发展历史、现状和趋势可以从创始与发展、机理与构成、特点与应用、研究与前景等几个方面加以阐述。

### 创始与发展

直流输电的形成与发展过程大致可以分为移植尝试、探索研究、重新兴起和迅速发展四个时期。

**移植尝试时期** 这个时期约在20世纪30年代以前。19世纪初发展起来的电报实现了电信号的有线传输。虽其电流微弱,但启迪人们移植于电力传输。法国物理学家德普勒曾提出:如果输电电压足够高,即使沿着电报线路也可能将较大的功率输送到较远的用电地点。1882年,他利用米斯巴赫煤矿直流发电机,以1500~2000 V电压沿着57 km的电报线路,把电力送到在慕尼黑举办的国际展览会上,完成了第一次直流输电试验,也是有史以来第一次取得成功的输电试验。

1889年,瑟瑞(Thury)用直流发电机串联组成瑟瑞方式高压直流电源,受端电动机也是采用串联方式运行的。当时,直流输电电压、功率和距离曾分别达到125 kV、20 MW和225 km。但是高电压大容量直流电机的换向有困难,而且直流电机串联运行操作比较复杂,可靠性不高。因此,在当时直流输电的发展受到了限制。

19世纪末,人们逐步掌握了交流电原理,并研制成功了三相交流发电机、变压器和感应电动机。在当时情况下,交流电无论在发电、变压、输送、分配和用电等方面都比较方便、经济和可靠,电力的生产和使用逐渐由交流替代了直流。

**探索研究时期** 这个时期大约在20世纪30~40年代。在此时期内,探索用各种方法和器件形成的换流器,替代直流电机作为直流高压电源。

当时,直流输电虽由于缺少可靠的换流设备影响了其发展,但毕竟有着交流输电所不能替代的特点。最主要的是:直流输电的输电容量和距离不受两端交流电力系统同步运行稳定性的限制。因此,美国、德国、瑞典等国的科学家和工程师仍继续研究直流输电技术,不断进行探索。

1901年发明的汞弧整流管可用于整流。1928年有

栅极控制的汞弧阀问世,使逆变得以实现。其间还出现过用同步的机械开关进行换流的麦克斯型装置等设备。终于研制成功可供工程实用的单阳极栅控汞弧阀,也相应建成了 8 项探索性直流输电工程,为直流输电再次兴起作好了准备。

**重新兴起时期** 这个时期大约为 20 世纪 50~60 年代。世界上第一个工业性直流输电工程于 1954 年建成,从瑞典本土经海底电缆向哥得兰岛送电,其额定直流电压、容量和电缆长度分别为 100 kV、20 MW 和 95 km。这个工程的成功引起了不少电力工业发达国家的兴趣和重视。在此时期中,相继建设了十多项直流输电工程,其中绝大部分工程采用汞弧阀,而且几乎都是含有电缆线路(既有海底电缆,也有地下电缆)的输电工程。

电缆线路用于直流比用于交流有更显著的优点。同样大小的电压,直流的绝缘材料省,而且无稳态基频电容电流占用电缆芯线截面积。

汞弧阀在运行中会发生逆弧,而且需要真空技术装备和复杂的温度控制,起动时要预热。这些对直流输电的发展是有所制约的。20 世纪 70 年代初,发明并研制成晶闸管整流元件(SCR),商业品名简称为可控硅。用晶闸管元件适当地串(并)联可构成晶闸管阀,从而替代了汞弧阀。

**迅速发展时期** 这个时期是 20 世纪 70~80 年代。电力电子和微电子技术的迅速发展,晶闸管阀换流器的问世并在直流输电工程中应用,有效地改善了直流输电的运行性能和可靠性,促进了直流输电技术的发展。直流输电技术在远距离输电和非同步联络等方面得到了扩展应用。

晶闸管阀没有逆弧故障,而且制造、维护和检修都比汞弧阀方便。1970 年瑞典首先在哥得兰岛直流输电的原有汞弧阀换流器上叠加了晶闸管阀以扩建增容,同时在现场对晶闸管阀作考验性运行。其增容部分直流电压为 50 kV,增送功率为 10 MW。1972 年投入运行的加拿大伊尔河非同步联络站是世界上第一个全部采用晶闸管换流器的高压直流工程。此后,世界上新建的直流工程均采用晶闸管阀。随着电力电子技术的快速发展,以及水冷和光纤技术的应用,晶闸管阀本身也得到了进一步开发。

在此时期直流输电的发展很快,1960~1975 年间,容量年平均增长仅 460 MW,而 1976~1980 年间年容量增长达 1500 MW。

机理与构成

直流输电系统的一次电路主要由整流站、直流线路和逆变站三部分组成,如图 1 所示。送端与受端交流

系统对直流输电所起的作用也是不可忽略的,它们为整流器和逆变器提供实现换流条件;同时,送端电力系统作为直流输电的电源提供所传输的直流功率,而受端则相当于负荷,接受由直流输电送来的功率。因此,两端交流系统与直流输电有密切的关系,是分析和研究直流输电必不可少的组成部分。两端交流系统一般是很复杂的,它包括发电厂、变电所、输电线路和负荷,在分析计算中往往采用简化的等值系统来代替。此外,直流输电的控制调节系统与交流输电的不同,它是直流输电正常起动和停运、正常运行、运行参数的改变和自动调节以及故障处理等必不可少的组成部分。

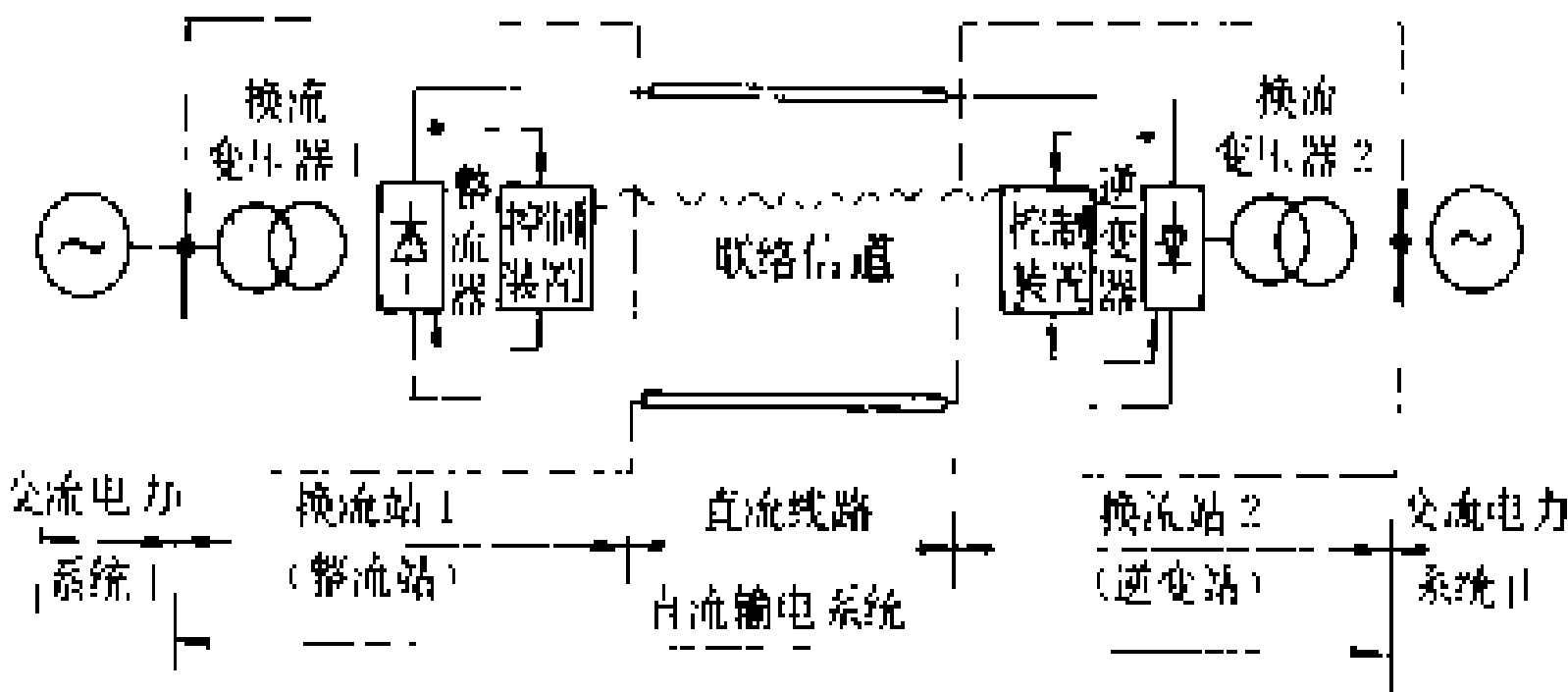


图 1 直流输电系统示意图

因此,直流输电系统包括整流站、直流输电线路、逆变站以及控制调节保护系统等四部分。而从广义说,为了进行直流输电系统分析和研究,往往也要将送端和受端的交流等值系统包括在内。

**工作机理** 图 2 是直流输电基本原理简图。其中包括有两个换流站、直流线路以及两端交流系统 I 和 II。换流站中设有换流器实现交流和直流之间的变换。

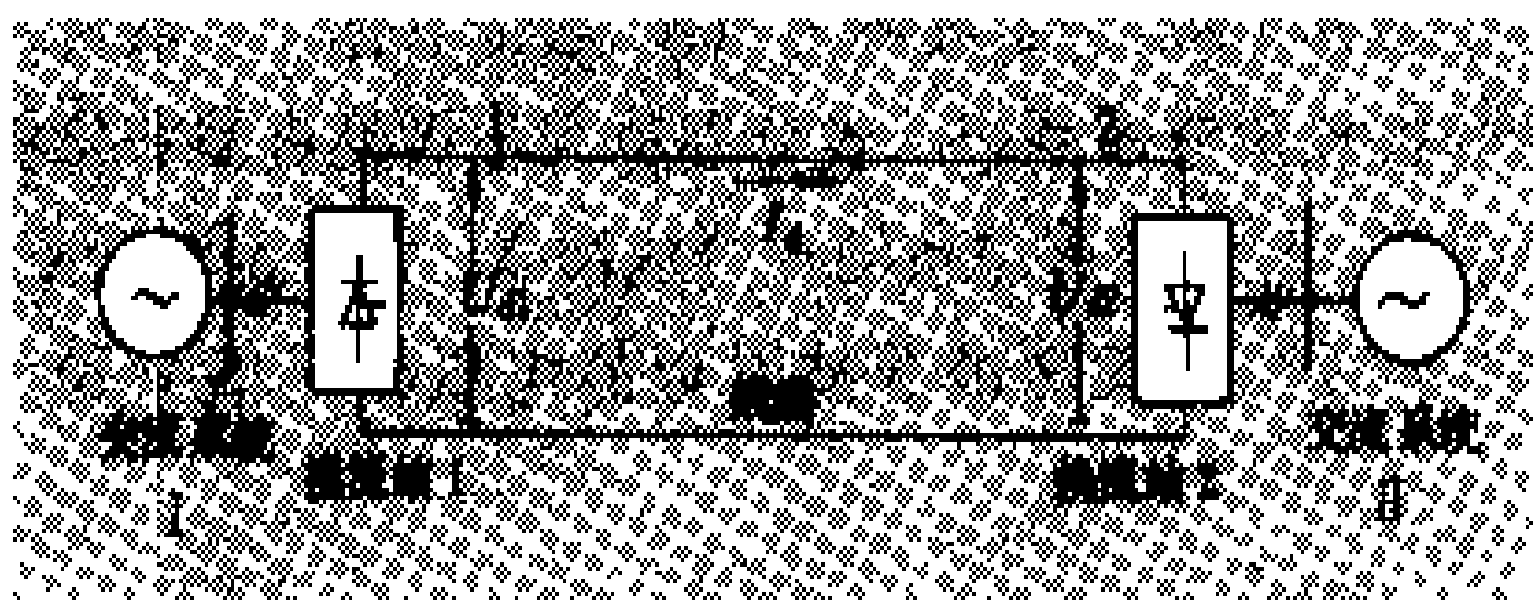


图 2 直流输电基本原理简图

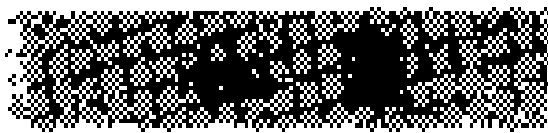
换流器由一个或多个三相换流桥串联构成。每个换流桥有六个桥臂。桥臂都是可控的,也称之为阀或阀臂。阀臂则由汞弧阀或晶闸管阀构成。

当系统 I 向系统 II 输送电力时,换流站 1 运行于整流状态,把系统 I 送来的三相交流电变换成直流电。经直流线路送到换流站 2。换流站 2 的换流器运行于逆变状态,把直流电变换为三相交流电送入系统 II。

假定直流线路的电阻为  $R$ ,整流站直流输出电压为  $U_{d1}$ ,逆变站电压为  $U_{d2}$ ,则直流系统的运行参数和变量可用以下公式表示:

直流电流:  $I_d = (U_{d1} - U_{d2}) / R$ ;

整流站输出的直流功率:  $P_{d1} = U_{d1} \cdot I_d$ ;



逆变站接受的直流功率： $P_{d2}=U_{d2} \cdot I_d$ ；

直流线路压降： $\Delta U_d=U_{d1}-U_{d2}=I_d \cdot R$ ；

直流线路损耗： $\Delta P_d=P_{d1}-P_{d2}=I_d^2 \cdot R$ 。

正常情况下，一般是由逆变站控制直流输送电压，由整流站控制直流电流，从而输送一定的功率。为了减小直流线路损耗，得到较好的运行经济性，直流电压应保持略小于最高允许值运行，而直流功率的改变由整流站控制直流电流来实现。因此，直流输送功率是可控的。它与交流输电有很大的不同。

直流输电线路不传输无功功率，但整流器和逆变器在进行换流时，均需一定量的无功功率。两端换流站所需的无功功率可表示为

整流站消耗的无功功率： $Q_{c1}=P_{d1} \cdot \tan \varphi_1$

逆变站消耗的无功功率： $Q_{c2}=P_{d2} \cdot \tan \varphi_2$

式中  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别为整流器和逆变器的功率因数角。

直流输电系统可方便地将输送的有功功率方向反转（或称潮流反转）。由于换流阀的单向导电性，直流电流的方向不能改变，直流输电的潮流反转是通过改变直流电压的极性来实现的。若从系统Ⅰ向系统Ⅱ送电时，直流电压为正极性，从系统Ⅱ向系统Ⅰ送电时则为负极性。利用控制系统可方便快速地改变直流电压的极性，从而实现潮流反转。

**系统构成** 图3(a)为二端直流输电系统的基本接线图。在换流站中，换流器交流侧的三个端子分别接到两站交流电力系统某一节点的三相，换流器直流侧的两个端子分别接到直流输电线路的两导线。两个直流端子称为两极。换流器的中央一点接地，极对地电位为正者称正极，为负者称为负极。接地点把一个换流站内的换流器分成两半，也分别称为正极换流器和负极换流器，对于换流站也同理分成两半，并分别称为正、负“半站”。如果两极导线对地的电压额定值分别为

+100 kV 和 -100 kV，则称为±100 kV 双极直流线路。连同两端换流站装备和工程设施一起，总称为±100 kV 双极直流输电系统。有的工程只暂先建一个极，则相应称为单极直流线路和单极直流输电系统。

两侧的接地点之间的大地（或海水）构成直流输电系统的回流电路。在一般正常稳态运行时，两个极导线中的直流电流大小相等，而方向相反，因此回流电路中基本无电流通过。对阀中央的接地点一般仍沿用“中性点”这个术语。

**两端直流输电系统** 它的构成主要可分为单极、双极和背靠背直流耦合系统三类。

(1) 单极系统。接线方式有大地（海水）回流方式和导线回流方式两种，如图4所示。单极系统一般正极接地，只有一根负极导线，负极的电晕引起的无线电干扰和受雷击的几率比正极的小。①单极大地回流方式。由于用大地（海水）做回流电路，节省了线路投资，但两端要有工作可靠的接地电极能承担预定的持续直流电流。大地电流所经之处，埋在地下和置于地面的金属管道和设施将遭电化腐蚀。单极大地回流方式通常作为双极系统的一个极线路故障后的为时短暂的非正常运行方式，也可作为分期投资建设的一个过渡阶段。单极大地回流方式也称为单极一线一地制。②单极导线回流方式。用低绝缘导线代替大地（海水）作为回流电路，可避免造成电化腐蚀之害。一般选择低绝缘导线的一端接地，以固定直流输电各部分的对地电位，保证设备运行安全，单极导线回流方式也称为单极两线制。

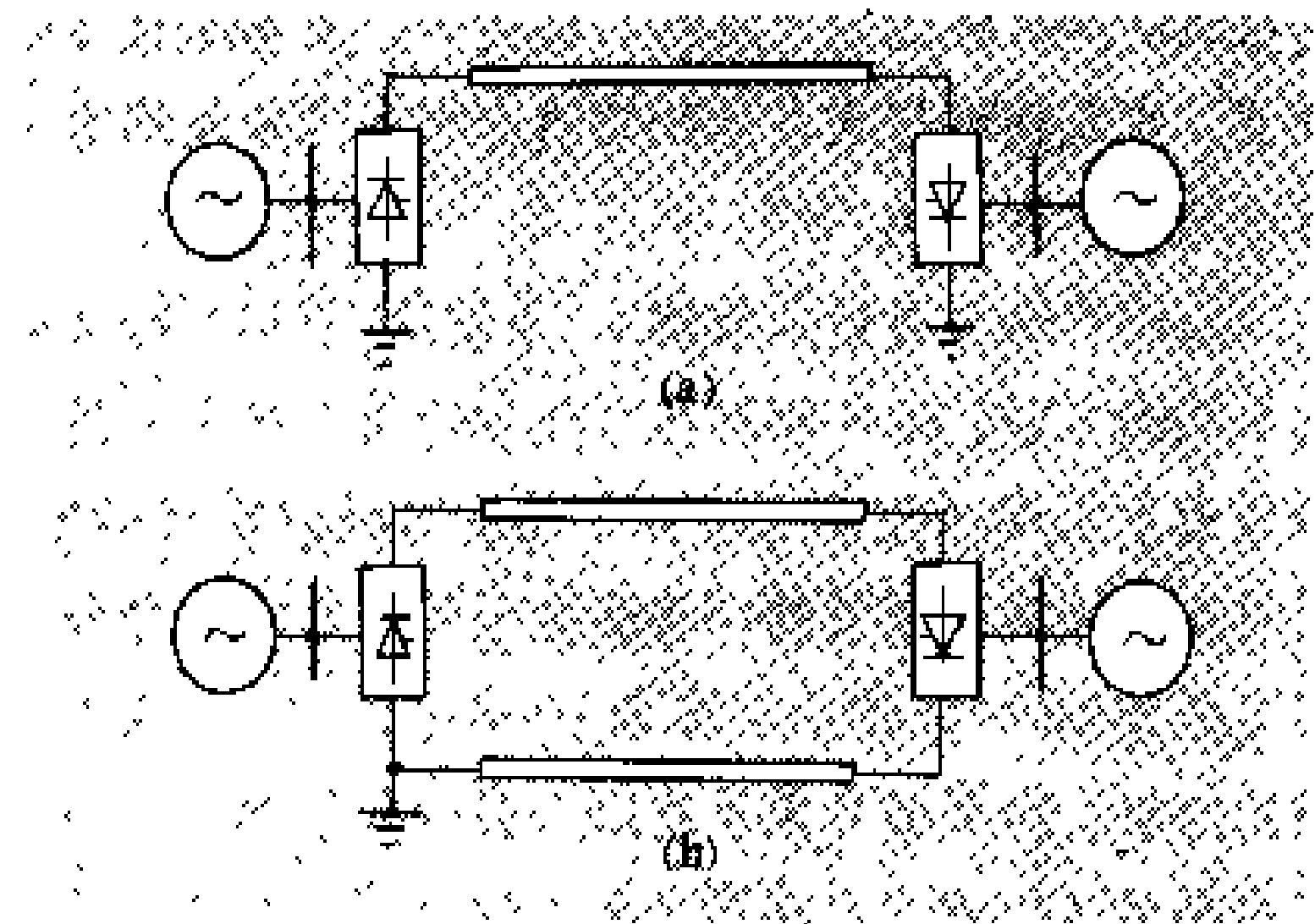


图4 单极直流输电系统的构成

(a) 一线一地制；(b) 两线制

(2) 双极系统。接线方式有：①两端中性点接地，以大地（海水）为回流电路的两线一地制；②一端中性点接地无回流电路的两线制；③以导线作为回流电路的三线制。如图5所示。双极系统各接线方式的特点可对照单极系统分析。

(3) 背靠背直流耦合系统。既可联络两个额定频率相同而实际运行频率不同的交流系统，也可联络两个额定频率不同的交流系统。联络两个额定频率不同

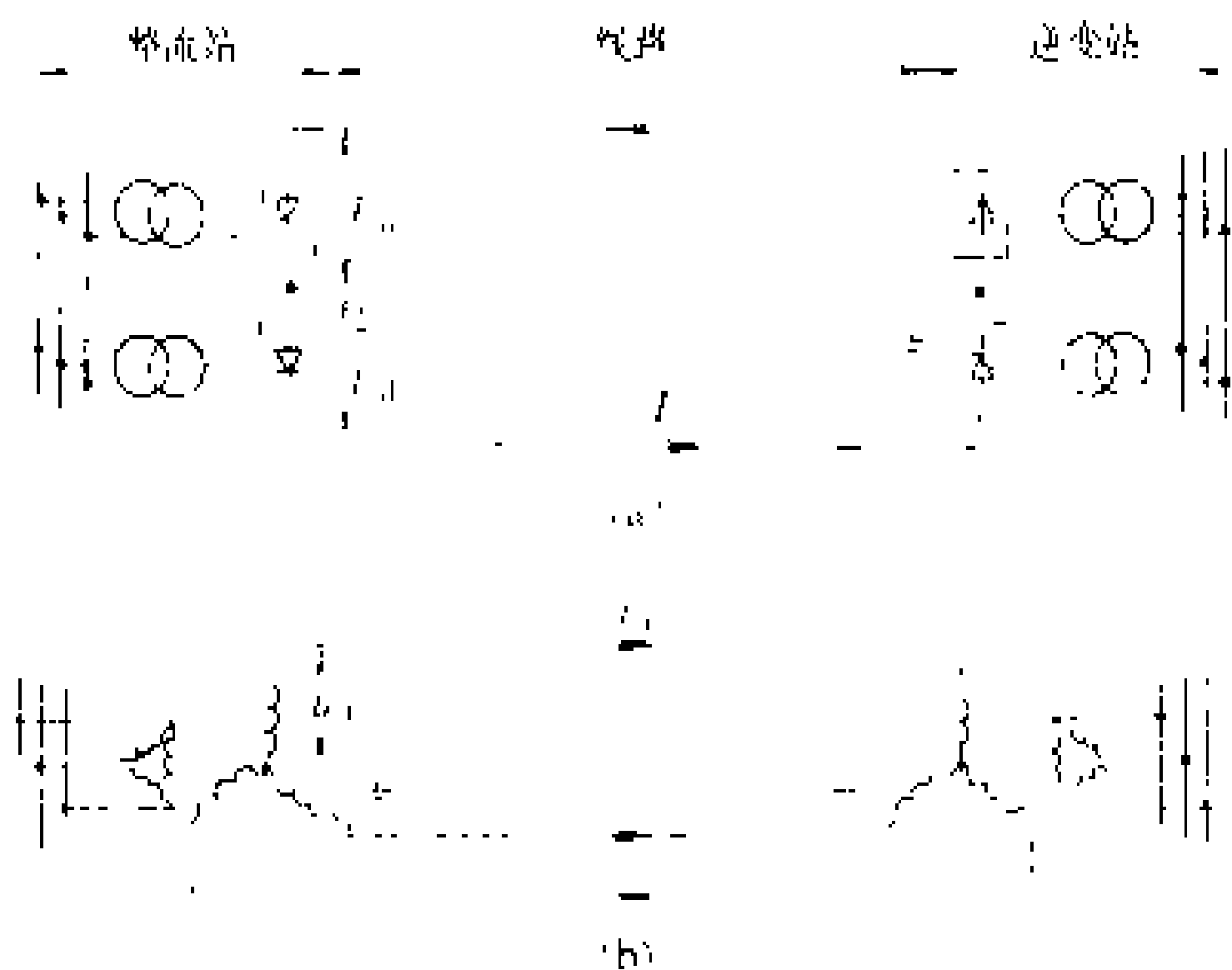


图3 直流输电系统基本构成与相应的交流输电系统

(a) 直流输电系统；(b) 交流输电系统



的交流系统的背靠背直流耦合系统又称为变频站。背靠背直流耦合系统可以看作输电线路长度等于零的直流输电系统。其构成方式可以分为并联型与串联型两种。

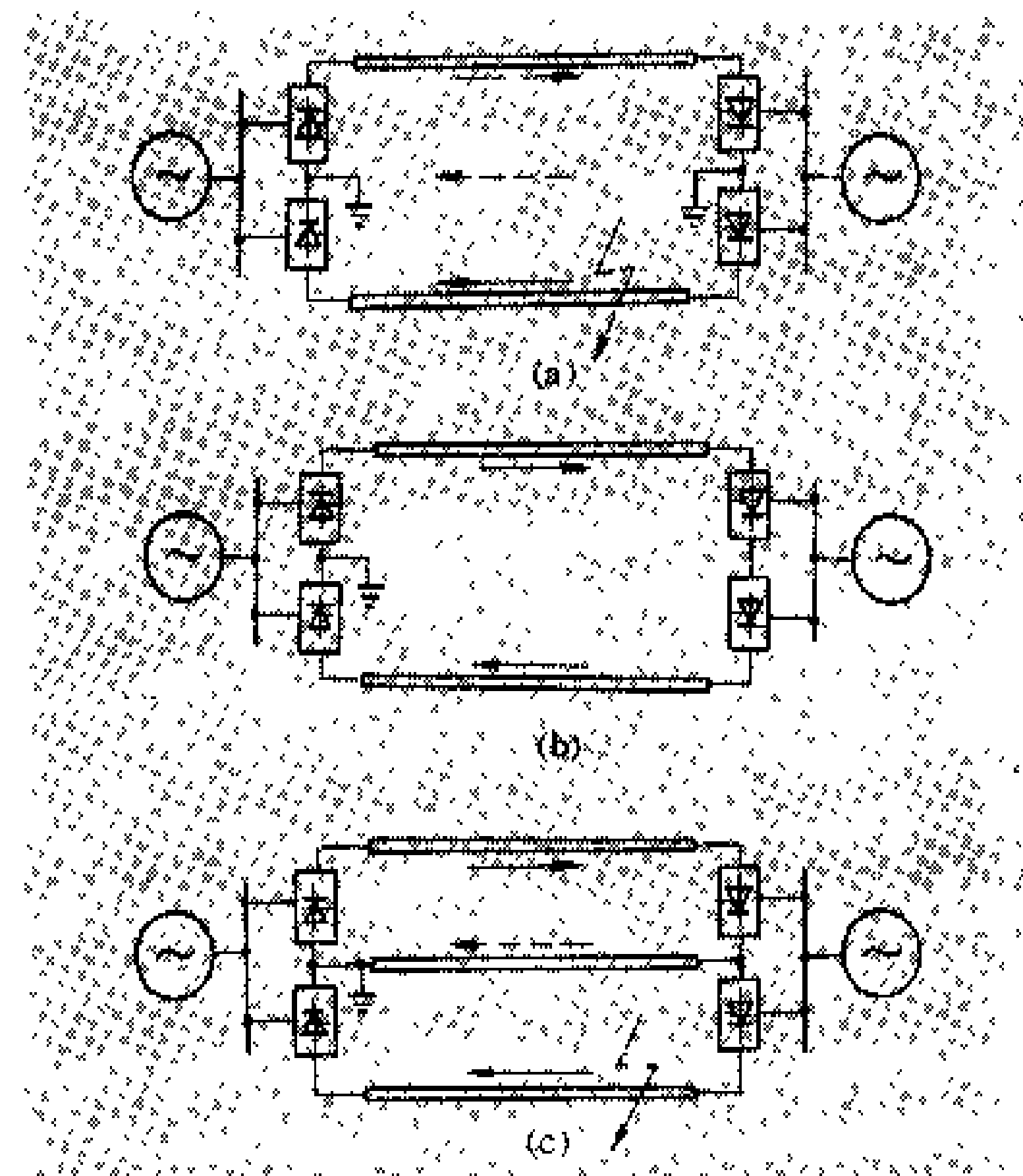


图 5 双级直流输电系统的构成

(a) 两线一地制；(b) 两线制；(c) 三线制

图中虚线箭头方向表示一极退出运行后回流电流方向

多端直流输电系统 与交流电力系统有三个或三个以上连接端口的直流输电系统。两端直流输电系统既是多端直流输电系统的基础,也是其特例。直流输电系统与交流输电系统一样,有分支、闭环以及两者混合型和单回路、双回路等接线方式。(见多端直流输电)

### 特点和应用

**直流输电特点** 通过理论研究和实践,对直流输电的特点可作如下归纳:

- (1) 交流有三相导线,直流只有正负两极导线。当输电距离超过某一定长度(即交直流输电等价距离)时,直流线路部分所节省的费用可抵偿换流站比交流变电所需增加的费用而有余,从而可获经济效益。
- (2) 直流输电的两端交流系统之间不存在同步运行稳定性问题。利用直流输电的快速控制和直流功率调制,还可提高与之并列的交流系统稳定性。
- (3) 用直流联络线实现两个交流系统间的联网,两交流系统可以各自调频,独立地调度和运行,互不干扰。
- (4) 大区电网间用直流联网,当一侧交流系统故障时,健全侧交流系统能实现对故障侧的紧急支援,当将危及健全侧时又可迅速实现分隔,以减小发生大面积停电的几率。

(5) 直流联络可避免电磁环网引起某些线路电流或功率越限,影响安全和增加网损。

(6) 采用直流互联不会增加两端交流系统各自的短路电流值。

(7) 直流输电能迅速简便而又精确地实现多目标的控制,以提高电能质量和可靠性。

(8) 交流电力系统通过交流弱网互联易发生低频振荡,可利用直流输电的快速控制来阻尼交流系统所发生的低频振荡和次同步振荡。

(9) 两个交流系统用交流联网,如果要改变有功潮流,必须等候有关的发电机组克服机械惯性改变发电机功率角才能达到目的。采用直流联网,则可快速方便地控制其输送功率,然后再由交流系统中同步发电机组进行调节,使系统各自恢复到新的稳态。

(10) 同样的电缆用于直流的工作电压要比运行于交流的高 2~3 倍。由于电缆单位长度的费用高,所以相应的电缆等价距离很短,约为 30~50 km,比架空线的短得多。因此采用直流电缆实现跨海峡送电和深入大城市供电是有利的。

(11) 直流线路在稳态运行时没有电容电流,沿线电压分布较平稳。直流线路也不需要无功补偿。用直流电缆芯线截面所表明送电能力不会被电容电流所占,可实现远距离电缆送电。

(12) 直流超高压架空线路的电晕损耗和无线电干扰都比相应的交流超高压线路小。

(13) 直流输电的额定电压可根据需要进行选择,便于分期投资和建设。

**直流输电应用** 根据直流输电一系列的技术经济特点,其主要的有:①远距离大功率输电;②海底电缆送电;③交流电力系统之间的非同步联络和分隔;④当交流电力系统互联或配电网增容时,可以作为避免短路电流增加的措施;⑤采用地下高压直流电缆深入大城市向负荷密度高的街区供电。

结合中国国情,考虑到国民经济和用电增长、电力工业需求的发展和输配电设备研制和生产情况,在 2000 年前,中国大部分电力网将形成以交流 500 kV 为主的网架。在这些地区,采用 750 kV 为更高一级的电压,级差过小,不合理。因此采用直流线路作为 500 kV 交流电力网间的联络线和远距离输电是较为有利的。及早掌握和运用直流输电技术是电力网发展中的一项战略性决策。

### 研究与前景

直流输电是电力系统中近年来得到迅速发展的一项新技术。随着电力系统技术经济需求的不断增长和提高,直流输电受到广泛的注意并获得不断的发展。同



时,电力电子、微电子、电磁和绝缘新材料、光纤、超导、近代电路、仿真、自动控制以及电力系统运行、控制和规划等与直流输电相关的学科和技术也有着日新月异的进展。这是促进直流输电进一步开拓的积极因素。为研究者提出了众多的课题,同时也展示了广阔的应用前景。

**研究课题** 直流输电远不如交流系统那样成熟和定型,在各方面都有种种课题有待研究。

(1) 控制系统的高技术化。它是以大规模集成电路、多微处理器、分层结构和多重化提高可用率为主要特征的换流器控制系统的开发。除了常规的控制性能之外,尚应具有改善交流系统运行性能和提高其稳定性的控制特性。

(2) 紧凑型换流站。用电密度高的城市和市郊,架空线无走廊,采用地下电缆供电应选用直流方式。市郊地价贵而且换流站站址的选择常受到当地空气污染的限。因而紧凑型技术就显示出它的优越性。

换流阀的冷却介质、绝缘介质和结构的研究是紧凑型换流站的重要研究课题。国际上对 SF<sub>6</sub> 绝缘和氟利昂冷却曾进行过研究。对于直流母线和连接线以及换流站的主要设备(如换流变压器、平波电抗器、滤波器等)采用气体绝缘封闭型方式的研究工作也正在进行。

(3) 同步发电机-变压器-换流器成组接线方式的技术经济性和关键技术的研究。

(4) 多端直流输电系统中换流装置的主要运行特性和控制方式。

(5) 直流断路器。对其应该承担的任务加以研究。试制和试运行并研究控制系统和继电保护在正常运行调节和事故处理时的配合。

(6) 强迫换相(也称人工换流)技术的研究。

(7) 谐波滤波器设备小型化及采用气体绝缘封闭型装置。

(8) 门极可关断晶闸管元件(GTO)的应用。它能在  $\delta < 0^\circ$  情况下,通过门极控制实现关断以提高换流器的功率因数。

(9) 利用直流侧或交流侧谐波分量的反馈以抑制谐波的技术。

(10) 应用新技术缩短直流线路继电保护动作时间。

**发展前景** 目前中国与许多国家一样,都在现有建设和运行经验的基础上,积极开展直流输电的研究工作。直流输电将会在远距离大容量输电、电缆输电、电力系统联网等方面,得到更大的发展。许多科学技术领域的新成就也将使直流输电技术的应用得到扩展。多种新能源发电如磁流体发电、太阳能电池和燃料电

池以及热核聚变直接发电等,所产生的电能都是直流电,需要逆变技术配合,将电能送入交流电力系统,以供使用。电力系统的储能环节如抽水蓄能、压气蓄能、蓄电池储能、制氢储能、超导线圈蓄能等,往往需要整流或逆变技术配合。近年来国际上发展的“灵活的交流系统”(FACTS)也与电力电子技术和换流技术有密切的关系。

**参考书目**

浙江大学发电教研室直流输电科研组. 直流输电. 新一版. 北京: 水利电力出版社, 1985  
Kimbark E W. Direct Current Transmission. New York: John Wiley & Sons, 1971

(戴熙杰 黄志明)

zhiliu shudian dianci yu huanjing yingxiang  
**直流输电电磁与环境影响** (electromagnetic environment of DC transmission)

直流输电工程设施在运行中的电磁过程对其周围空间环境所造成的影响。直流输电工程设施包括直流输电线路、换流站、接地(海水)电极和回流电路。它们的电磁环境影响主要有对通信、广播和电视的电磁干扰,对人与生物的电场效应和对其它工程设施的影响。这些影响与交流输电的相似(见输配电电磁与环境影响)。在条件基本相同的情况下,直流输电对环境的电磁影响一般要比交流的弱一些,这也是直流输电的优点之一。直流输电对环境的电磁影响可分为:电晕的电磁干扰、电晕的可听噪声、直流架空线路离子流、换流阀的电磁干扰和回流电路对环境的影响等方面。此外,在直流输电线路和有关交流线路中的谐波对邻近并行的音频信道也可能引起干扰(见直流输电系统谐波)。

直流架空线路电晕的电磁干扰 产生直流电晕的机理与交流电晕的不同在于:直流电晕外区充满了与电晕极性相同的空间电荷,它起到调整导线周围电场强度使之趋于均匀、抑制游离和稳定电晕电流的作用。这是在同样条件下,直流电晕及其派生现象较交流电晕为弱的主要原因。(见输电线路电晕)

当条件相同时,极性不同的直流电晕无线电干扰有很大差别。正极性的直流电晕电磁干扰要比负极性的强得多,因而单极直流线路一般采用负极性的。双极直流线路的电磁干扰大于单极的。在雨、雪、雾气候下,除导线开始湿润的一段时间外,直流电晕干扰比好天气时的低。因此,直流架空线路下允许的信噪比(20 dB)可比交流的(23.5~28 dB)低。

采用分裂导线等减小导线表面场强的措施,可降低直流线路电晕干扰,但其有效程度不及交流。

直流线路绝缘子只在污秽、受潮时才会成为直流

线路干扰的主要来源。

直流电晕对电视的干扰较交流电晕的低得多,离正极性导线 30 m 以外就不成为问题。

直流电晕的可听噪声 由电晕脉冲产生的,与交流电晕噪声不同,它没有低频纯音而有不规则的噼啪声。正极电晕的可听噪声比负极电晕的强烈。坏天气下的可听噪声也比好天气时略低。目前还没有制定有关直流电晕可听噪声的标准。

直流架空线路离子流 它引起对人与生物的电场效应,可以用地面静电场场强(无空间电荷情况)、地面合成电场强度(有空间电荷情况)、地面离子流密度、人或物体截获的离子电流等参数来表征。地面离子流场各处不同:单极线路的最大值在导线正下方;双极线路的最大值在导线外侧数米处,线路中心线上几乎为零。最大地面静电场场强与交流线路相近,但合成场强比静电场场强大得多,可达 3~3.5 倍,数值可达 20~30 kV/m。地面离子流密度很小,最大处只有  $10^{-7}$  A/m 左右,比交流情况下的感应电流小 1~2 个数量级。而人体的直接感觉阈值成人男女分别为 5.2 mA 和 3.5 mA,比交流的要大,因此直流线路下稳态电击很微弱。对人体的效应主要是人在直流电场中的直接感觉和离子流场中电荷积累引起的暂态电击。直流可感觉场强约 22 kV/m,已成为选择直流导线对地高度的控制因素。中国葛洲坝—上海直流线路设计中将地面合成电场强度限制在 30 kV/m 以下。暂态电击由绝缘物体在离子流场中的充电电荷决定。充电电荷及其能量与离子电荷密度、合成场强和物体形状、尺寸等有关,可达到相当大的数值。绝缘的人体触及接地的物体或接地的人触及绝缘的物体(例如车辆)时,其感觉可达到烦恼的程度。暂态电击的电荷感觉阈值是:1  $\mu$ C 轻度感觉,1.5  $\mu$ C 尚可接受,2  $\mu$ C 以上感觉严重;能量感觉阈值是:2 mJ 开始有感觉,5 mJ 感觉明显,50 mJ 感觉很烦恼。物体的泄漏电阻对其充电的影响十分敏感:人体在数百兆欧以下,车辆在数十兆欧以下,充电电压就大为降低。至于直流电场对人体的长期效应迄今尚无定论。一般认为和交流电场一样,尚看不出其危害。提高导线对地高度对降低地面场强,特别是减小离子流密度很有效。采用分裂导线虽然增强了地面静电场,但减小了合成场强。

直流电晕产生的有害气体浓度远小于允许值,可以不予考虑。

换流阀的电磁干扰 是在换流阀触发开通和关断时产生的。此时阀两端电压急剧降低或升高,产生的干扰频带很宽,约为 30~160 kHz 之间。因回路参数的不同,会在某些频率上产生峰值。这种干扰波可以直接发射或以母线和架空线为天线发射出去。如不采取措施,

干扰可能超过允许值,尤其是在采用汞弧整流器的情况下。至于晶闸管整流器,没有如此严重,原因是回路中有阻尼因素,阀电压变化较慢。可以用高频阻塞电路、屏蔽、缩短连接线等措施来抑制换流阀的电磁干扰。

回流电路对环境的影响 直流输电的地中直流电流对地下和地面金属物体的电解腐蚀,比交流下严重得多。设计时接地电极和金属物体之间或两个金属物体之间都应保持足够的距离,以减小金属表面的电流密度,必要时可以加装阴极保护或绝缘涂层,以减轻腐蚀。

海水中直流电流对海洋生物也有影响,鱼类有趋向阳极的习性,以致造成伤亡。此外,电极附近会出现有害气体和化学成分等,设计时应设置鱼类保护设施,例如阳极周围的隔离屏障等。

单芯海底直流电缆会引起其上方船舶磁罗盘的读数误差。

直流电流借道三相交流中性点的接地而流经交流系统某些部分,将引起有关变压器铁芯不对称饱和、噪声和发热。设计时应保持交流和直流系统接地电极间有足够的距离,以免直流电流借道流通。

陆地接地电极在正常和非正常运行时,其周围地面的跨步电压应对人畜无害,如果超过允许值,应采用隔离遮栏等措施。

#### 参考书目

Kimbark E W. Direct Current Transmission. New York: John Wiley & Sons, 1971

(叶冀誉)

zhiliu shudian gongcheng xitong shiyan

直流输电工程系统试验 (system tests of DC transmission project)

应用测试手段,对直流输电系统各个设备和整体的各种工作状态进行的试验。用以验证工程是否全面满足技术规范书和合同的要求,并确定能否投入正式运行。整个试验分为预备性试验、分系统试验、系统试验(包括试运行)和验收试验四个阶段。预备性试验和分系统试验用于检验和考核单个装置及局部系统的性能,是进行系统试验的前提和基础。系统试验是考核各分系统组成完整系统的相互间协调配合和整体性能。验收试验是对整个工程进行全面的考核和鉴定,是系统试验的外延和终结。验收试验通过后,工程即可投入商业运行。每一个直流输电工程,由于它所联系的交流系统情况不同,它的任务和作用也不相同,新技术的采用又会带来新的运行特点,所以试验的项目和内容必须结合具体工程的特点作必要的变更和增减。

**预备性试验** 对各个设备分别进行检查和试验,以确认在运输中无损伤,现场安装符合规范书要求,并具备启动和加载的条件。试验的内容主要有:①导电部分电阻的测量,连接点接触电阻的检验;②绝缘试验,包括绝缘电阻测量,压力、泄漏比和湿度的检验,绝缘油试验等;③变压器变比、极性和磁化曲线的检验;④机械和联锁装置的检验;⑤辅助设备功能试验;⑥控制、保护及报警系统硬、软件功能测试,各种定值的检验;⑦运行系统和备用系统转换功能试验;⑧通信设备和信道传输性能的测试等。

**分系统试验** 分系统是由一些相关的设备及其控制装置组成的功能单元。一般按一个控制柜和它所控制的设备作为一个分系统。对所有分系统都要分别进行加电启动或通电实验,检验其电气特性、机械特性或工作特性,测试控制、保护及远动通信之间的协调配合及各种功能,并进行定值的调整。分系统试验结果要与出厂试验数据对照,进一步判断分系统安装、调试质量以及能否全面执行预定的任务。各分系统试验全部通过后,才允许进行下一阶段的系统试验。

**系统试验** 将各分系统组成完整的直流输电系统进行各项试验,以检验整个系统的功能。一般可分为两步进行:①站内系统试验:在换流站内部进行的背靠背试验和零功率试验;②端对端系统试验:各换流站分别接到各端的交流系统,构成包括直流线路在内的整个直流输电系统的试验。如果没有条件进行背靠背试验,或制造厂家和电力部门已有丰富的调试经验,则可在零功率试验完成之后直接进行端对端试验。

**背靠背试验** 换流站内部两组换流器的交流侧分别经过换流变压器接到同一交流母线,直流侧通过平波电抗器相连,形成交流→整流→逆变→交流的试验环路。滤波器组和无功补偿设备均投入试验。背靠背试验用于检验被试设备承受负荷、承受电压的能力;控制系统的静态、动态特性以及保护、监测系统的功能。试验过程中,整流器从交流系统吸取的有功功率,经逆变器返回,因此交流系统仅需供给少量的有功功率(换流设备的有功损耗)和一定数量的无功功率(由控制角的大小决定)。在这种情况下,即使被试设备有缺陷,对交流系统的影响也较小。通过背靠背试验可以及时发现和处理设备的缺陷,初步调整控制系统的参数,使下一步端对端试验更顺利和安全地进行。而且,当一个换流站安装就绪后即可进行背靠背试验,从而缩短整个的试验时间。

**零功率试验** 在换流器直流侧通过平波电抗器短接的情况下进行的整流工况试验。此时,直流电压平均值接近零(为平波电抗器上的压降),整流器的触发角接近 $90^\circ$ ,直流有功功率接近于零,无功功率最大,运

行条件最为恶劣。一般试验时间仅为 $1\sim 2\text{min}$ 。通过零功率试验,主要检验:①换流器和换流变压器承受电流的能力;②阀换相振荡过电压系数,阀均压阻尼回路元件的性能;③换流器触发和控制系统的部分性能;④换流阀的绝缘情况;⑤阀构架振动和噪声水平;⑥滤波器承受负载的能力等。

**端对端试验** 对于双极直流输电系统,通常两极先分别接成单极-大地(海水)回路方式进行试验。两个单极试验通过后,再进行双极输电试验。试验项目分为静态试验、扰动试验和故障试验三类。

(1) 静态试验。主要内容有:①检验系统启动和停运过程的特性;②测量换流器的静态特性(外特性和功率特性),检验测量系统的精度;③测量交流侧和直流侧的谐波电压和电流;④测量接地极电阻、地中电流分布、跨步电压、感应电压以及长期单极运行时接地极的温度;⑤检验直流系统的过负荷能力;⑥检验换流站及直流线路附近地区的电磁环境影响。

(2) 扰动试验。检测系统受到操作等扰动时的特性。主要试验内容有:①交流滤波器、无功功率补偿装置和换流变压器的投入和切除操作;②通过控制系统的功率、直流电流、直流电压及逆变器定关断角等整定值阶跃试验,调整各控制参数使动态响应最优;③系统控制方式的转换;④系统运行接线方式的转换;⑤潮流反转;⑥直流线路自动再启动等。

(3) 故障试验。通过人为制造的故障试验,检验控制系统的响应特性、各种故障控制对策的功能、交直流系统间的互相影响;调整继电保护的整定值,检查其动作特性以及谐波对继电保护的影响等。故障试验项目包括:①整流器不触发故障;②逆变器换相失败故障;③交流系统瞬时性短路故障;④直流线路极对地瞬时性短路故障等。

**试运行** 在系统试验通过后进行,直流输电的全部设备均应投入运行。试运行时间一般为 $15\sim 30$ 天。在此期间换流设备的可用率应不低于规定值。要求试运行期间整个系统应不间断地、稳定和正常地运行。

**验收试验** 实际上,工程验收从预备性试验开始就已陆续进行,特别是端对端试验的大量试验项目同时也属于验收试验。因此,当这些项目的试验数据和结论等资料齐全时,即可作为验收试验处理,不必重复试验。在系统试验中未包括的试验项目,可以再单独进行试验。验收试验包括稳态运行性能、控制保护性能和人工故障试验三方面内容。

(1) 稳态运行性能。主要项目有:①直流最小电流运行的稳态性能;②从最小电流到额定电流各种稳态运行方式的性能,包括额定电压额定电流运行、降低直流电压运行、换流器大触发角运行、单极大地回路运

行、单极金属回路运行、由逆变器控制电流和功率运行以及其他规定的运行方式;③过负荷运行,过负荷倍数按工程规范书规定。各种稳态运行方式需检测和记录:直流电压、电流和功率;各换流器触发角、换相角、关断角和功率因数;换流站交流电压和无功功率;双极功率控制时地中不平衡电流;交直流两侧谐波电压和电流;各设备温升;换流站和直流线路对无线电、电话及载波通信的干扰水平,可听噪声等。

(2) 控制和保护性能。主要项目有:①系统起动及停运过程的特性;②各控制指令阶跃变化的动态响应,包括直流电流定值、逆变器关断角或直流电压定值及直流功率定值等阶跃变化试验;③控制和运行方式的转换,包括正常直流电压与降压方式的转换,单极大地回线与单极金属回线的转换,换流站无功功率控制的转换以及其他控制方式的转换;④各种设备的转换和操作,包括极的投入和退出,换流变压器操作,交、直流滤波器的操作,并联电容器和并联电抗器的操作,站用电系统的转换和故障,远动通信系统的转换和故障等;⑤直流线路开环试验;⑥整流站交流线路跳闸失去电源的试验;⑦逆变器丢失触发脉冲导致换相失败试验;⑧直流功率调制控制特性试验等。

(3) 人工故障试验。通过人为制造的故障试验,考核控制和保护系统工作的正确性以及交、直流系统在大扰动时的动态性能。主要项目有:①一个换流阀丢失控制脉冲的故障;②换流站直流侧短路故障;③直流线路单极接地短路故障;④两端交流系统接地故障;⑤接地极引线接地故障等。如果出于系统运行安全的考虑,某些故障试验不能安排时,应采用替代的方法对相应的性能进行验证。

(蔡 邠 范瑞逢 吴国炎)

zhiliu shudian jiedi dianji

**直流输电接地电极** (DC transmission earthing electrode)

直流输电系统为实现换流站中性点与陆地或海水的直流电流回流电路间的连接而在每一端换流站及与其有适当距离的近区设置的接地装置和设施。它一般由接地电极引线、接地电极馈电电缆和电极接地体三部分组成。接地电极要按实际可能通过的直流电流设计,其埋设地点通常要求离换流站 8~50 km,以避免换流站的接地网受到电解腐蚀和引起变压器直流偏磁而导致的磁饱和。

**接地电极引线** 连接换流站中性点与接地电极馈电电缆间的线路。可以采用低绝缘架空线或电缆作接地电极引线。在引线长度较大时,一般采用架空线比较经济。架空接地电极引线可用铁塔、水泥杆或木杆架设。在靠近电极接地体的一定范围内,为避免铁塔底部

金属构件的电解腐蚀,可用木杆或水泥杆。如果采用铁塔,则必须考虑在引线导体与铁塔间稍加绝缘,以防止直流电流流经铁塔底部,使其受到腐蚀。

**接地电极馈电电缆** 接地电极引线至电极接地体间连接用的电缆。对于阳极馈电电缆应采用架空电缆接到每个电极单元,避免电缆受到电解腐蚀。

**电极接地体** 由若干散流元件和活性填料构成。直流输电系统采用的电极接地体有两种基本类型:①与大地土壤接触的电极接地体,称陆地电极接地体,或简称为陆地电极;②与海水接触的电极接地体,称海水电极接地体,它又分为设置在海岸边的海岸电极和设置在海底的海中电极。

**陆地电极接地体** 按照不同的埋设方式,陆地电极接地体又分为水平接地电极和垂直接地电极两种。图 1 为各种陆地电极的示意图。

(1) 水平电极接地体。电极接地体沿水平方向埋设,利用接近地表薄层土壤电阻率较低的有利条件,采取浅埋,一般埋深为 1.2~8 m。电极接地体的布置可分为环形、星形和直线形水平布置等型式:①环形电极接地体,如图 1(a) 所示。具有接地体散流元件电流沿面分布均匀以及电极总长度小的优点,但环中之地不便利用,占地面积大,而且散流元件不易分段,维修灵活性差。②星形电极接地体,如图 1(b) 所示。其形状不要求十分规则,径向射线分支根数又可根据需要选定,一般用 3~6 根,适用于土壤特性有变化的地区。还可以分支(段)运行,便于维修。但它的散流电流比较集中在分支的末端以及电极中心,占地面积比环形还大。③直线形电极接地体,如图 1(c) 所示。适用于接地体埋设场地窄长,特别是沿河流或小溪的场地。直线形用地经济,最适合于分段,用材量亦比星形的省。它的缺点是接地体终端处的电流密度很高。

(2) 垂直电极接地体。由一些主轴垂直地面的散流元件组成,如图 1(d) 所示。有埋在浅层的,但更多的是埋设在地下 60 m 或更深的深层,以接触到电阻率比地表更低的地层。垂直电极接地体单元的平面布置亦可选用直线形、圆形和网络形等。直线形排列的端部电极接地体单元和网络形排列的外周单元所流散的电流大于中部单元,相应的电极材料消耗也比中部单元要快。采用垂直电极接地体能使其附近的地面电位梯度问题得到缓解,但与水平电极接地体相比,它排放电解所产生的气体要困难得多,一般要设置排气管,如果排气管被堵塞,仍将可能引起接地电阻的增大。

**海水电极接地体** 图 2 所示为海水电极的示意图。海水是一种导电性比陆地还要好的回流电路,海水电阻率约为  $0.2 \Omega \cdot m$ ,而陆地则为  $10 \sim 1000 \Omega \cdot m$ ,甚至更高。海水电极分为海岸电极和海中心电极两种。

(1) 海岸电极。其导电元件必须有支持物，并设有牢固的围栏式保护设施，以防止受波浪、冰块冲击而损坏。在这些筒形的保护设施上设有很多孔洞，保证电极周围的海水能够不断循环地流散，以便电极散热和排放阳极周围所产生的氯气与氧气。海岸电极多数采用沿海岸直线形布置，以获得最小的接地电阻值。

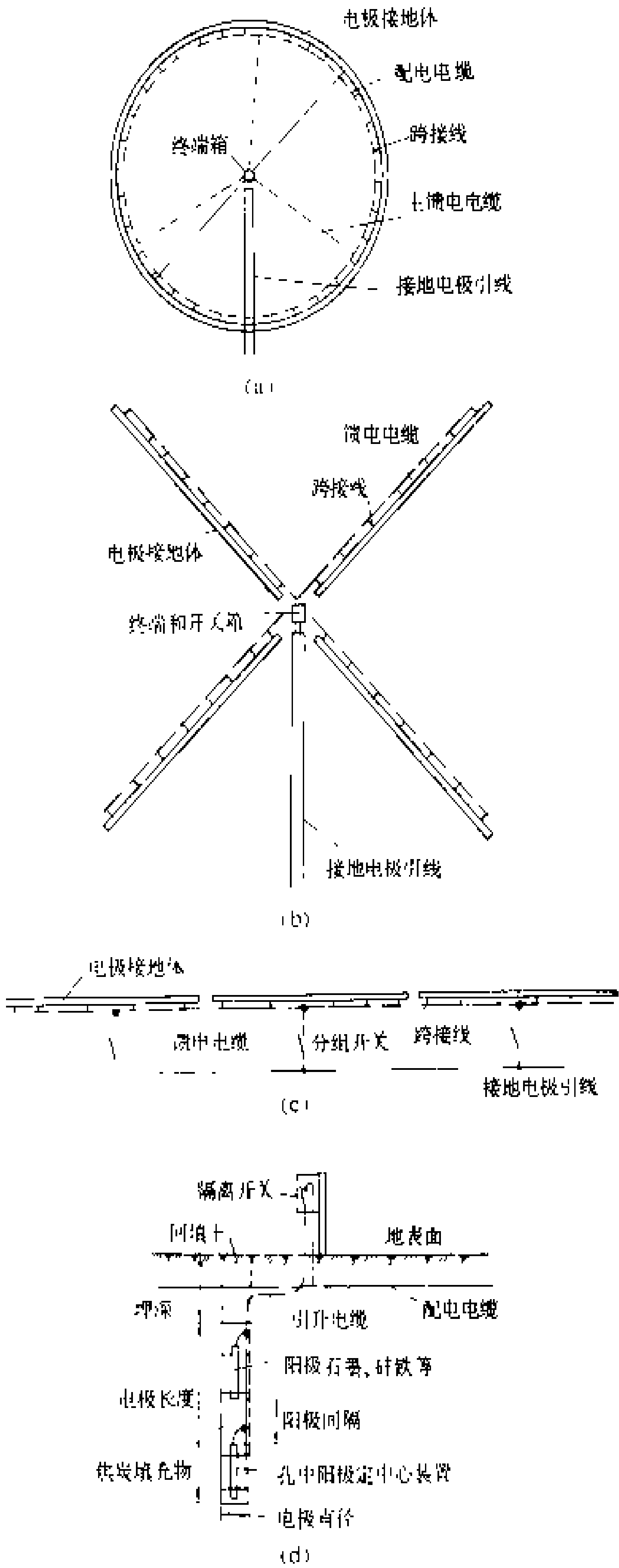


图1 陆地电极接地体示意图

(a) 环形电极接地体；(b) 星形电极接地体；(c) 直线形电极接地体；(d) 垂直电极接地体的一个电极单元

(2) 海中电极。在不宜选用陆地电极或海岸电极情况下，也可将电极设置在海底。如果仅作为阴极性的接地电极运行，采用海中电极是比较经济的。如果运行中需潮流反转要变更极性，则每个接地极均应按阳极要

求设计，并防止因鱼类有向阳极聚集的习性而受到伤害。

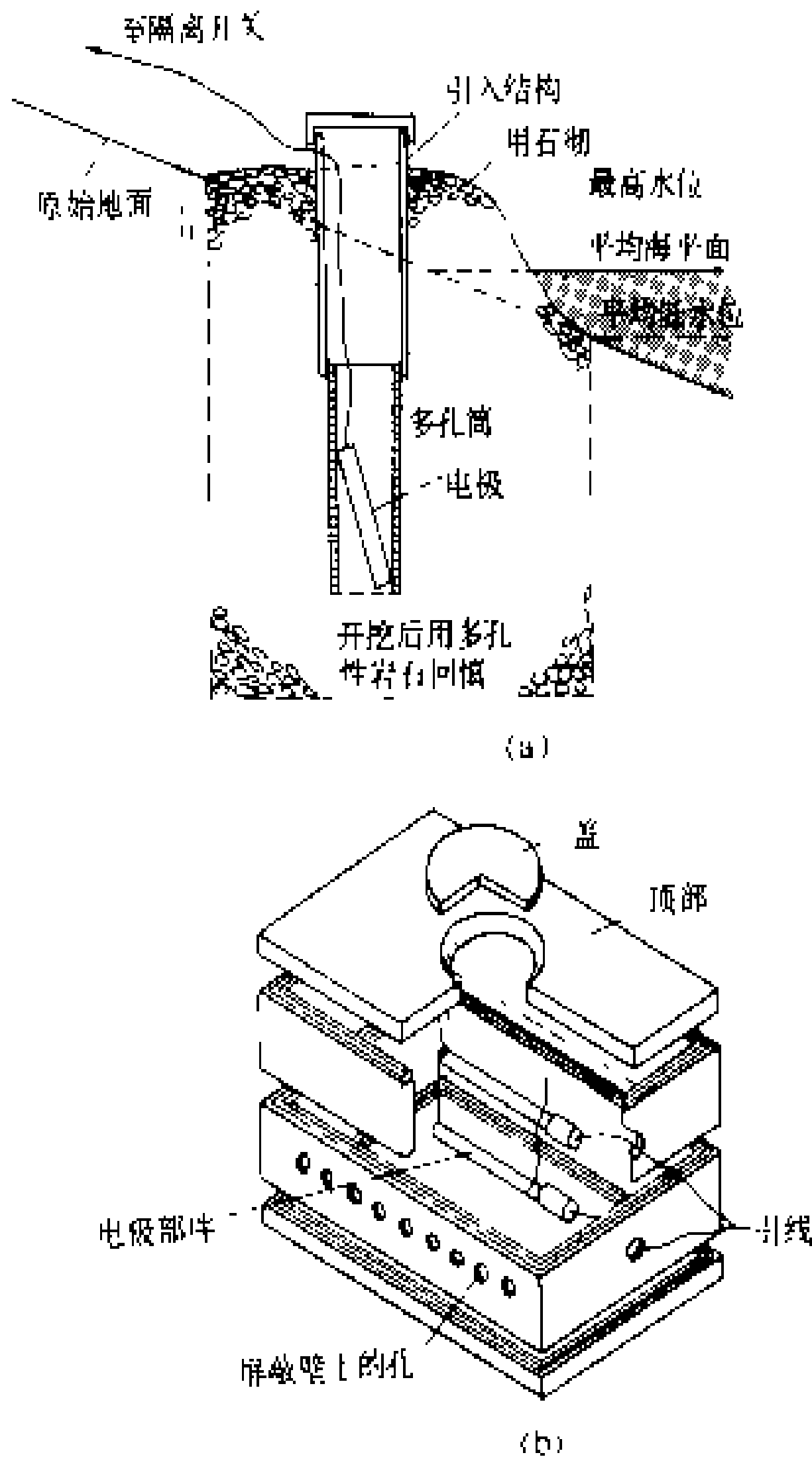


图2 海水电极示意图

(a) 海岸电极单元；(b) 海中电极单元

海岸电极和海中电极由于比陆地电极有较小的对地电阻和电场强度而得到广泛应用。设计时应考虑阳极附近生成氯气对电极的腐蚀作用，选用耐氯气腐蚀的阳极材料，例如石墨和镀铂的钛等。陆地电极的阳极可选用腐蚀消耗量较少而又经济的阳极材料，例如碳棒、石墨等，并在其四周填充焦炭等活性材料。

接地电极的设计均需满足电极对地电阻值、热稳定性和电极附近地面电位梯度的要求。通常在阳极接地电极周围设置围栏等屏障，以防止人、畜、鱼以及其它海洋生物等误入而受害。

参考书目

[瑞典] 乌尔曼著，直流输电，张金堂等译，北京：科学出版社，1983  
(Uhlmann E. Power Transmission by Direct Current. Springer-Verlag, 1975)

(王继祺)

zhiliu shudian kongzhi fangshi

**直流输电控制方式** (DC transmission control modes) 直流输电系统运行控制中所采用的自动调节形式。这些控制方式往往是以被控制量和(或)控制目的来命名的。例如控制直流电流使之等于

整定值的定电流控制,提高交流系统运行稳定性的交流系统振荡的阻尼控制等。其中直流系统的电压、电流和各端换流器的触发角或关断角等基本运行参数的控制属于直流系统的基本控制。除此之外,还有:定功率控制、换流站无功功率和交流电压控制、交流系统频率控制、紧急功率支援控制以及交流系统振荡的阻尼控制等。

**换流器控制** 通过改变换流器触发脉冲相位实现换流器运行的控制。它的调节响应很快,一般只要 30 ms。主要控制方式有:定电流控制、定触发角控制、定关断角控制和定直流电压控制等四种。

**定电流控制** 将换流器直流电流维持为整定值的控制方式。其作用是保持电流稳定,防止故障电流过大或避免直流电流过小而发生间断。整流器和逆变器均需设置这种控制。其他非基本控制大都通过改变基本控制的整定值来实现。(见直流输电系统运行特性)

**定触发角控制** 使换流器的触发角维持为给定值的控制方式,是多端直流系统整流器的控制方式之一。只起单方向控制作用,使触发角不小于或不大于给定值的定触发角控制,称为最小或最大触发角限制控制。采用定电流控制的整流器,应设置最小触发角限制控制,用以防止触发角过小而使换流阀中成串的元件不能可靠地同时触发导通。最小触发角一般整定为 $5^\circ$ 。另外,还设置最大触发角限制控制,防止触发角过大,直流电压极性反转,不再运行于整流状态。逆变器也设有最小触发角限制控制,防止转变为整流运行状态。

**定关断角控制** 将逆变器的关断角维持为整定值的控制方式。关断角的整定值一般取 $15^\circ\sim 18^\circ$ 。其作用:首先是减小逆变器换相失败的几率,其次是降低逆变器所消耗的无功功率。逆变器采用其他控制方式时,定关断角控制只起限制最小关断角作用。

**定直流电压控制** 将换流器直流侧电压维持为整定值的控制方式。连接到弱交流系统的逆变器采用这一控制方式更有必要,它将有利于提高换流站交流母线电压的稳定性。

一个换流器除了主控制方式外,还要设置若干控制方式,由模-数变换和逻辑单元根据运行条件的变化实行控制方式的自动切换。例如定电流控制的整流器,应具有最小及最大触发角限制控制。定触发角或定直流电压控制的整流器,为防止过电流需设置定电流控制,当运行电流大于电流整定值时,立即切换为定电流控制;为了防止两种控制竞争动作,电流整定值应大于定触发角或定电压运行时的实际电流值。定关断角或定直流电压控制的逆变器,也需设置定电流控制,用以防止电流过小;电流整定值应比正常运行电流小。定直流电压控制的逆变器,还需具有最小关断角限制控

制。

**换流变压器分接开关控制** 通过改变换流变压器分接开关位置并与换流器控制相配合而实现的各种控制。主要控制方式有三种:①控制整流器的触发角。整流器用定电流控制时,调节分接开关位置使整流器触发角保持在给定的范围内,例如 $15\pm 5^\circ$ 或 $15\pm 3^\circ$ 。②控制换流器直流电压。换流器用定触发角或定关断角控制时,调节分接开关位置使换流器直流电压保持在给定值附近,例如为额定电压的 $100\%\pm 2\%$ 。③控制换流器空载电压。调节分接开关位置使变压器阀侧空载交流电压(正比于换流器空载直流电压)保持为给定值。换流变压器分接开关切换的速度很慢,响应时间为秒级。在直流系统运行受到扰动的暂态过程中,这种控制作用太慢。它主要在稳态运行和经济调节方面起作用。

**直流输电基本控制** 保证直流系统稳定、可靠运行所必备的控制,由各端换流器控制和它们之间的协调控制构成。直流系统的稳态和动态特性,主要取决于基本控制。二端直流输电的基本控制方式有定电流-定关断角控制和定电流-定电压控制两种。

**定电流-定关断角控制** 整流器设有定电流控制及触发角限制控制,逆变器设有定关断角控制及定电流控制。两侧电流整定值通过信道进行协调,保持逆变器电流整定值比整流器的小一个电流裕额。电流裕额通常取额定电流的 10%。正常运行时,由整流器定电流控制保持直流线路电流等于整定值,逆变器由定关断角控制保持关断角为定值,直流线路的电压由逆变器侧换流变压器的阀侧电压决定,改变电流整定值即可调整直流输送功率。当整流站交流电压短时大幅度下降(或逆变站交流电压大幅度上升),整流器调节到最小触发角而失去控制电流能力时,逆变器则自动转换为定电流控制,维持直流电流不致过小。这种基本控制方式用于受电端为强交流系统的场合,具有很好的运行特性和经济效益。

**定电流-定电压控制** 与定电流-定关断角控制方式不同之处是,逆变器采用定直流电压控制,正常时由逆变器保持直流电压为定值。另外,逆变器还设有定电流控制和最小关断角限制控制。这种基本控制方式对交流系统的稳定性有利,特别适用于受端弱交流系统的场合。

多端直流系统的基本控制见多端直流输电系统控制。

**定功率控制** 使直流输电功率保持为定值的自动控制方式。这种控制是通过基本控制来实现的,它根据给定的功率整定值和实际直流电压值确定出直流电流整定值,再通过定电流控制的作用使实际功率等于功

率整定值。另外,也可根据实际功率与功率整定值的偏差,修正原电流整定值来实现。设置这种控制,可使直流输电功率不受交流系统运行状态变化的影响,而且能够方便、直接地调整功率,还便于系统调度中心实行直流功率的遥控调度。

**换流站无功功率和交流电压控制** 使换流站与交流系统间所交换的无功功率或站内交流母线电压保持在给定范围内的控制方式。直流系统在基本控制作用下,保持直流电压在接近额定值的给定范围内运行时,换流器消耗的无功功率大致与直流功率成正比。当直流输电功率变化时,要依靠调整换流站无功功率补偿设备的出力来保持换流站无功功率平衡和交流母线的电压水平。无功功率全部采用并联电容器补偿时,要将电容器分成可分别操作的若干组。当交流电压或交换的无功功率越限时,通过投入或切除部分电容器组进行控制。交流滤波器一般也分成几组,在满足滤波要求条件下也可部分参与控制。换流站如设有同步调相机或静止补偿装置时,则可利用它们进行连续、快速控制,电容器组用作分级粗调。此外,还可应用换流器控制无功功率和交流电压。换流器的基波功率因数等于实际运行的直流电压与理想空载直流电压之比。当直流系统具有定功率控制,换流变压器控制理想空载直流电压基本不变时,可通过调节直流电压的整定值,改变换流器消耗的无功功率,达到控制换流站与交流系统交换的无功功率和交流电压。通常换流器控制与电容器组投切控制相配合,以保持换流器最大触发角不超过长期运行的允许值。利用换流器快速控制无功功率的能力,可以提高交流电压的稳定性。

**交流系统频率控制** 在直流线路连接没有交流联系的两交流系统时,可以通过调整直流输电功率,控制某端交流系统的频率。由于直流输电功率调节速度比交流发电机快,所以可以提高频率质量。控制方式有定频率控制和频率/功率控制等。定频率控制用于保持某端交流系统的频率为额定值。其原理是根据被控系统的频率偏差修正基本控制的电流整定值,从而改变直流功率,使被控系统的频率保持为额定值。采用定频率控制时,被控系统的负荷波动全部由另一交流系统通过直流线路来承当,因此要求提供功率的交流系统和直流系统有足够大的调频容量。频率/功率控制是在定功率控制基础上增设频率控制,其作用是当被控系统频率偏差小于给定的死区时,由定功率控制输送给定的功率;当频率偏差大于死区时,使直流功率与频差成正比变化。这时,被控侧换流站与交流发电机一起,担负频率的一次调节任务。

连接两个交流系统的直流联络线,可以通过改变直流功率,参与两侧系统频率的调节。当任一侧交流系

统出现频率偏差时,都可相应地改变直流功率,使频差减小。这种调频方式,能在一定的程度上共同利用两个系统的备用容量,改善两系统的频率质量。

**紧急功率支援控制** 由直流线路连接的交流电力系统中,某一系统因故障而使频率大幅度下降时,由非故障系统通过直流线路快速提供功率支援,防止故障系统频率下降到危险值而失去运行稳定性。这种控制根据频率的变化而动作,当故障系统频率下降到规定值以下时,将预先给定的支援功率整定值立即加到原功率整定值上,再通过定功率控制来实现紧急功率支援。

**交流系统振荡的阻尼控制** 交直流联合电力系统中含有二端或多端直流输电线路时,应用快速控制直流功率,阻尼交流系统低频振荡的一种控制方式。一般用各换流站交流母线上测得的频率偏差变化值的某种组合(例如线性组合)作为控制信号,加到电流整定值上,由定电流控制环节执行阻尼控制。这种方式又称为电流调制控制。控制信号也可加到功率整定值上,由定功率控制环节执行控制,称为功率调制控制。在某些情况中控制信号还可以简化,例如二端直流线路与交流联络线并联运行时,可以利用交流联络线功率的变化率作为直流线路的电流或功率调制信号,以阻尼两端交流系统间的低频振荡。通常交流系统对低频(例如0.2~3 Hz)振荡的阻尼性能是很差的,而直流功率控制在这一频率范围内有较好的响应能力,而且所需的功率调节量很小,即使直流输电满载运行,仍能提供足够的阻尼。这种控制已成功地应用在许多实际工程中,成为提高交流系统电压稳定性的一种有效措施。

(王传佑)

zhiliu shudian kongzhi xitong fenceng jiegou

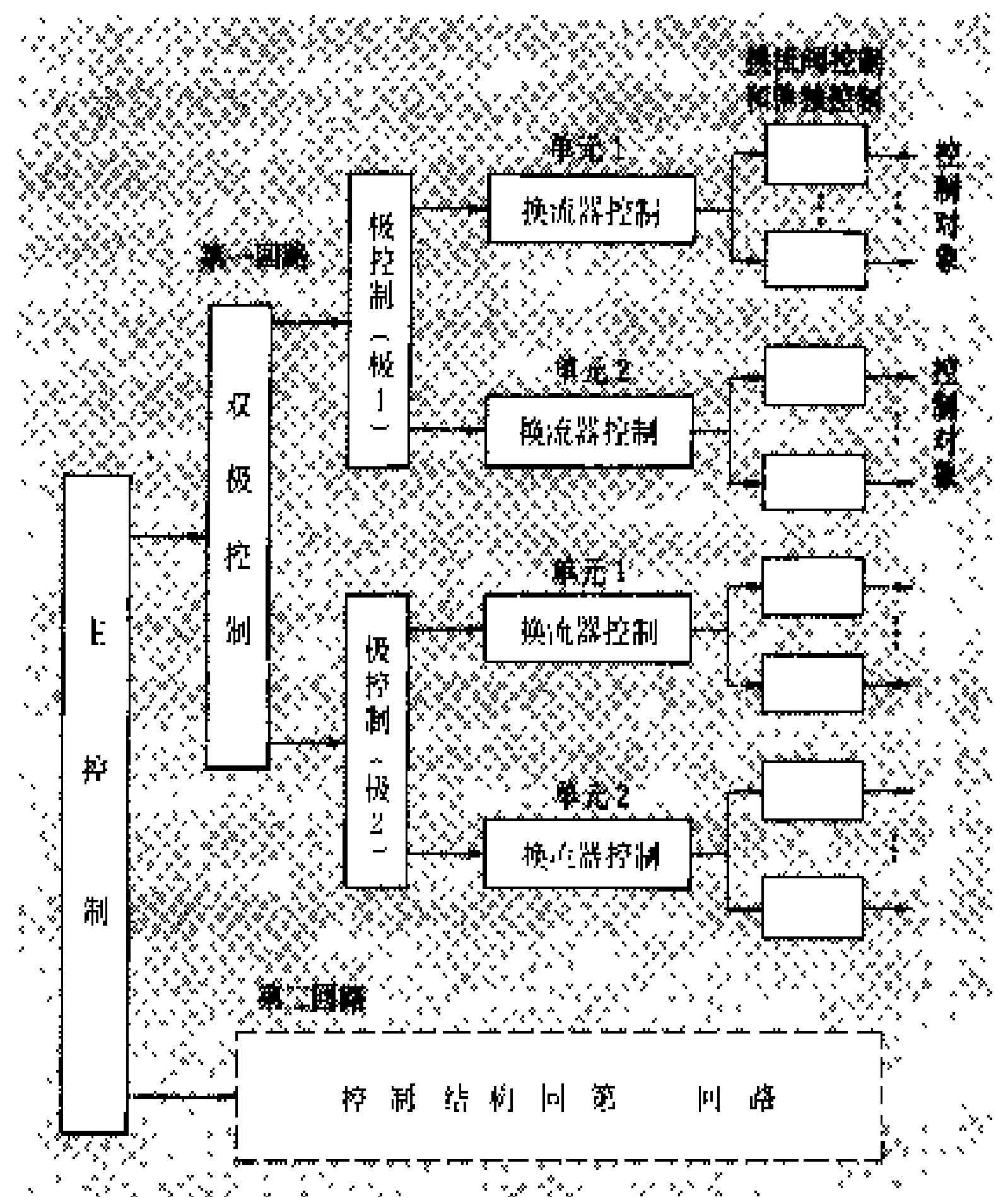
## 直流输电控制系统分层结构 (hierarchy structure of DC transmission control system)

将直流输电换流站和直流输电线路的全部控制功能按等级分为若干层次而形成的控制系统结构。其主要特征是:①各层次在结构上分开,层次等级高的控制功能可以作用于其所属的低等级层次,且作用方向是单向的,即低等级层次不能作用于高等级层次;②层次等级相同的各控制功能项目及其相应的硬、软件在结构上相互独立,它们之间不存在直接的控制作用,其中之一退出和投入工作或发生故障,对同等级的其他控制功能块没有影响;③直接面向被控设备的控制功能块设置在最低层次等级,控制系统中有关的执行环节也属于这一层次等级,它们一般就近设置在被控设备近旁;④系统的主要控制功能尽可能地分散到最低或较低的层次等级,高等级控制层次尽量简化,甚至只保留用指令形式协调下一层次控制的任务;⑤如果高



层次控制发生故障时，各下层次控制能按照故障前的指令继续工作，并保留尽可能多的控制功能。复杂的控制系统采用分层结构，可以提高运行的可靠性，使任一控制环节故障所造成的影响和危害程度最小，同时还可提高运行操作和维护的方便性和灵活性。

现代直流输电控制系统一般设有五个层次等级，从高层次等级至低层次等级分别为：主控制级、双极控制级、极控制级、换流器控制级、单独控制级和换流阀控制级。图示为一个具有两回双极直流线路、每极有两个换流单元的直流输电控制系统的分层结构框图。当每极只有一个换流单元时，为简化结构极控制和换流器控制可以合并为一级；当只有一回双极线路时，通常主控制和双极控制合并为一级。直流系统各换流站中，需指定其中的一个为主控制站，其他为从控制站。主控制级和双极控制级设置在主控制站中，它通过通信系统发出控制指令，协调各换流站的运行。



直流输电控制系统分层结构框图

**换流阀控制级** 对各个阀分别设置的等级最低的控制级。由地电位和高电位两个控制单元构成，主要功能为：①将处于地电位的换流器控制级送来的阀触发信号作变换处理，经电隔离光（或磁）耦合或光缆送到高电位单元，再变换为电触发脉冲加到各晶闸管元件的控制极；②晶闸管元件和组件的状态监测、高电位控制单元中直流电源的监视，监测信号经电隔离或光缆传送到地电位控制单元，经处理后进行显示，报警等。

**单独控制级** 换流站中除换流器外其它各项设备分别设置的自动控制、操作控制和状态监测设施，与换流阀控制级同属于最低层次的控制级。单独控制功能包括：换流变压器分接开关切换控制，换流阀冷却及辅

助系统的控制和监测，直流和交流开关场各断路器、隔离开关的操作和状态监视，直流滤波器组的投切操作和监测，交流滤波器组和无功补偿设备的投切操作、自动控制和状态监测等。

**换流器控制级** 每极各个换流单元分别设置的控制设施，用于控制换流器的触发相位。主要控制功能有：换流器触发相位控制，定电流控制，定关断角控制，直流电压控制，触发角、直流电压、电流最大值和最小值限制控制，以及换流单元闭锁和解锁顺序控制等。

**极控制级** 双极直流输电系统要求一极故障时，另一极能够单独运行，并能完成主要的控制任务。因此要求两极各自的极控制级完全独立并设置尽可能多的控制功能。主控制站的极控制级还担负协调从控制站同一极的极控制级工作的任务。极控制级的主要功能有：①向换流器控制级提供电流整定值，控制直流输电的电流。主控制站的电流整定值由功率控制单元给定或人工设置，并通过通信设备传送到从控制站。主、从控制站均设有电流整定值记忆单元，当通信故障时，各控制站按故障前瞬间的整定值运行。②直流输电功率控制，其任务是根据功率整定值和实际直流电压值决定出直流电流整定值。功率整定值由双极控制级给定，也可由人工设置。功率控制单元设置在主控制站内。③各种调制控制，包括电流调制和功率调制控制。用于实现交流系统振荡的阻尼控制，交流系统频率或功率/频率控制等。④极起动和停运控制。⑤故障处理控制，包括移相停运和自动再起动控制、低电压限流控制等。⑥各换流站同一极之间的运动和通信，包括电流整定值和其他连续控制信息和传输、各种控制指令的传输、交直流设备运行状态信息和测量值的传输等。

**双极控制级** 用指令形式协调控制双极的运行，主要功能有：①根据主控制级给定的功率指令，决定双极的功率定值；②功率传输方向的控制；③紧急功率支援控制；④两极电流平衡控制；⑤换流站无功功率和交流母线电压控制等。

**主控制级** 级别最高的控制层次，主要功能包括：①与电力系统调度中心通信联系，接受调度中心的控制指令，向调度中心输送有关的运行信息。②根据调度中心的输电功率指令，分配各直流回路的输电功率。当某一直流回路故障时，将少送的输电功率转移到正常的线路，尽可能保持原来的输电功率。

（蓝毓俊 吴国炎）

zhiliu shudian lianwang gongneng

**直流输电联网功能** (benefit due to interconnection of power systems) 见直流输电与交流输电。



zhiliu shudian xitong dongtai mofa

## 直流输电系统动态模拟 (dynamic modelling of DC transmission system)

应用相似原理在实验室内建立与实际系统及其中物理过程成适当比例缩小的一整套模拟装置及其技术。实际系统称为原型,模拟装置称为模型。直流输电系统模拟元件主要包括:换流器、换流变压器、交流滤波器和无功补偿装置、平波电抗器、直流滤波器和直流输电线路等,以及必不可少的两端交流电力系统或其等值系统的模型。模拟装置中各元件基本上都采用物理模拟,个别元件有时也采用数学模拟。大部分元件的模拟主要要求在工频范围内的参数和行为特性符合相似定理,但是直流输电系统中的滤波器要考虑的频率范围显然要宽得多。包括有直流部分的电力系统动态模拟也称为交直流电力系统动态模拟。直流输电系统动态模拟是电力系统动态模拟的一部分。

直流输电系统动态模拟的优点是真实性高,直观性强,可以方便地接入实物进行预调试。缺点是:①建造模型的费用大;②参数比较难于调整;③规模不可能做得很大,模拟复杂的系统有困难;④元件设计主要适用于稳态和机电暂态现象的研究,不能适应电磁暂态过程研究的要求。

直流输电系统动态模拟主要用于直流输电系统各种运行方式和控制保护方式的试验和研究,具体适用范围包括:①研究改善直流输电系统运行性能的措施;②研究和考验新的设备,特别是易于接口的二次监控设备;③用作调度自动化计算机的控制对象;④校验计算机数字仿真分析原理的正确性;⑤进行教学和人员培训。

见直流输电系统仿真装置。

参见彩图插页第36页113图。

(顾永昌 赵礼生)

zhiliu shudian xitong fangzhen zhuangzhi

## 直流输电系统仿真装置 (DC transmission system simulator; HVDC simulator)

在研究直流输电时,按照被研究对象原型以一定规律的比例缩小而建立的元件相似模型,并组合成的模型系统装置。它可以用来按比例相似地重演在原型中所发生的过程或实现设想的过程,以便于进行高压直流输电系统的性能试验和研究,也可以将自动控制装置直接接到仿真装置相应的电路中进行实时试验。

按仿真所采用的模型与原型相应变量量纲的异同以及所用的手段不同,可分为物理模拟和数学模拟两类。为了建模和使用的方便和经济,在一个仿真装置中也可以用不同性质的元件模型组合在一起。例如在交

直流电力系统的物理模拟中,发电机和电动机模型可以用派克方程和微处理机来实现的数学模拟,从而构成物理模拟和数学模拟相结合的仿真装置。由于数学模拟的方便、灵活,并具有较好的经济性,随着计算机技术的发展,数学模拟在直流输电和电力系统仿真装置中的应用,正在逐步扩大。

一套完整的直流输电系统仿真装置,包括直流输电系统的全部主要元件模型,如电源模型、换流器模型、换流变压器模型、交直流线路模型、滤波器模型、开关设备模型、避雷器模型、控制及保护系统模型等。此外,还有程序控制器、负阻补偿器、测量系统、数据收集与分析系统等辅助设备。

电源模型 分为交流电源模型及同步电机模型两类。

(1)交流电源模型。一般采用三相交流电压源,用来模拟无穷大交流系统。各相电压的幅值及相位均可独立调节,以模拟不对称交流系统的电压。

(2)同步电机模型。用来模拟同步发电机及交流系统的性能,亦可作为负载使用,模拟同步电动机的特性。这种电源模型又可分为旋转电机式和电子式两种。旋转电机式模型就是一台小型同步电机,适合于研究交直流混合系统的机电过程;电子式模型是用电子回路在同步电机派克方程的基础上建立的同步电机模型,可以用微处理机和放大器来实现。

换流器模型 基本元件是由六个阀臂按三相桥式电路组成的换流单元。按需要将几个换流单元的直流侧端子串接起来,便构成了所需的换流器模型。早期曾采用闸流管模拟工程实际应用的汞弧阀,20世纪70年代以后改用单个的小容量晶闸管元件来模拟晶闸管换流阀。

换流变压器模型 由线性变压器、饱和变压器及电抗器等元件组成。线性变压器漏抗很小,可忽略不计,视为理想变压器,其漏抗用外加电抗器来模拟。变压器的绕组都备有若干抽头,用以尽可能准确地模拟实际变压器的变比。饱和变压器用来模拟变压器的饱和特性,例如空载变压器合闸于交流电源的涌流过程等。

交直流线路模型 由电阻器、电抗器和电容器组成的Γ形或Π形三相四线制模型,既可用于交流输电线路模拟,又可用于直流线路模拟。电阻器、电抗器、电容器都备有抽头,供改变参数之用。用多个这样的集中参数模型链接起来,模拟实际的输电线路。

滤波器模型 分为交流滤波器模型及直流滤波器模型两种,均由电阻元件、电感元件及电容元件按需要连接而成。这些元件都具有若干抽头,供调整滤波器参数之用。

**开关设备模型** 有交流开关设备模型和直流开关设备模型两种。交流开关设备模型是用小容量晶闸管元件作为开关器件构成的,以模拟常规交流断路器电流过零后熄弧的特性。直流开关设备模型则用大功率场效应晶体管为开关器件构成,以便模拟直流开关切断电流的特性。

**避雷器模型** 由电阻、二极管及稳压管串并联组成的电子回路。二极管与稳压管配合,模拟避雷器的保护水平;电阻用来模拟避雷器残压特性。

**控制及保护系统模型** 由于各直流输电工程的控制、保护方式不同,而直流输电系统的性能又取决于其控制、保护系统的功能,因此,对不同的直流输电工程,需要采用与该工程基本相同的控制、保护装置。随着计算机技术的发展,可用计算机控制系统来适应各个不同工程的控制、保护要求。

**辅助设备** 仿真系统还需要以下辅助设备:①程序控制器,用来控制故障发生和进行试验的顺序和时间;②负阻补偿器,用以补偿换流变压器、换流器等模型的过大电阻压降,提高仿真的准确度;③测量系统,由若干隔离放大器组件构成,是试验数据检测接口;④数据收集与分析系统,由记忆示波器、模拟量和开关量等信息收集装置以及相应数学分析软件包等组成。

由于研究重点不同,仿真装置的容量有较大的差异。例如为了探索大容量直流输电与大容量原子能电站直接相连时可能发生尚未为人们熟知和掌握的现象,为此建立的直流输电仿真装置的额定值达 $\pm 1500\text{V}$ 、 $15\text{A}$ ,同步电机模型的相应容量达 $100\text{kV}\cdot\text{A}$ 。用于一般研究的直流输电仿真装置的额定值仅 $40\text{V}$ 、 $0.2\text{A}$ 。

世界上各直流输电设备生产厂家为了开发和设计直流输电设备,都建立了自己的直流输电仿真装置。而建设直流输电工程的电力用户,为了研究直流输电工程的运行性能以及培训技术人员,也建立了自己的仿真装置。中国也已建立了 $\pm 200\text{V}$ 、 $250\text{mA}$ 的多功能直流输电仿真装置,以满足在中国发展直流输电的需要。

(曾南超)

zhiu shudiao xitong guodianya

## 直流输电系统过电压 (overvoltages in DC transmission system)

在直流输电系统中极(或系统中某一个指定点)对地或两极(或系统中某两个指定点)间的电压值超过对应的最高允许运行电压值并对绝缘有危险的电压。直流输电系统中的过电压也可分为雷电过电压和内部过电压两大类。

**雷电过电压** 直流输电系统中的雷电过电压大都起源于交、直流架空线路。雷电放电在直流架空线路上

引起雷电过电压的机理与交流线路的一样,但由于直流输电系统所具有的某些独特性能,因此对交、直流线路的耐雷要求不应完全一样。因为直流输电系统处理故障的手段比较多样化,直流线路上发生雷击闪络的后果也不像交流线路那么严重,所以可适当降低对其耐雷性能的要求。

双极直流线路在防雷方面还有另一个重要特点:由于两极导线上的工作电压极性相反,当雷击杆塔或架空地线时,横担上将出现一冲击电压,异极性导线绝缘子串上受到的将是这一冲击电压和直流工作电压之和,而另一极绝缘子串上受到的电压为二者之差。所以对雷电过电压来说,双极直流线路具有不平衡绝缘的特性,因而它在雷电过电压下的运行可靠性可以与同杆架设并采用不平衡绝缘的双回路交流线路相当。

换流站的交流侧接有交流滤波器,某些直流线路上也接有直流滤波器,换流器和交流线路之间有换流变压器隔开,换流器与直流线路之间接有平波电抗器。所以从交、直流线路侵入换流站的雷电过电压的幅值与陡度都将显著减小,再加上站内还装有各种过电压防护装置,因而使得雷电过电压对于大多数换流站设备来说,威胁不大。

**内部过电压** 直流输电系统中存在着许多电感与电容元件,诸如平波电抗器、滤波器、冲击波吸收电容器、连接线的杂散电感与杂散电容等。当系统中发生故障或进行操作时,由于系统参数和工作条件的改变,会引起电容和电感间的电磁能量转换和振荡,造成内部过电压。直流系统的内部过电压可以出现在直流线路上,也可以出现在换流站内,它的产生机理、幅值、波形都与交流系统的内部过电压有很大的差别。

表中列出了直流输电系统中比较常见或比较重要的内部过电压。表中 $U_1$ 为交流二次侧线电压峰值, $U_d$ 为直流输出电压, $U_{d1}$ 为单一换流桥的额定电压。

**过电压防护措施** 为了降低设备的绝缘水平,必须先设法降低或限制作用在设备绝缘上的过电压幅值。直流输电系统中的过电压防护措施比较多样化,可分为降压措施和限压措施两个方面。

(1) 降压措施。妥善设计控制调节系统,有些内部过电压可利用合理的自动控制有效地加以抑制或消除;采用阻尼装置、平波电抗器、冲击波吸收电容器等。

(2) 限压措施。经历了保护间隙、碳化硅直流避雷器、金属氧化物避雷器三个发展阶段。

直流避雷器的运行条件具有一系列特点:①灭弧条件严酷,因直流电流没有自然过零点可以利用;②动作负载重,系统中的长电缆段、滤波电容器、冲击波吸收电容器等都要通过动作后的避雷器进行放电;③正常运行时的发热较严重;④某些直流避雷器的两端均

直流输电系统中的内部过电压

发源地	产生原因	出现地点	可能幅值
交流线路	操作波的电磁传递	交流二次侧	$1.7/U_1/\sqrt{3}$
	线路、滤波器等倒闸操作	交流二次侧	$1.8U_1$
	逆变侧全部交流线路被切除	交流二次侧	$3U_1$
换流站	站内接地故障	换流阀	$1.8U_{d1}$
	全电压起动(逆变侧开路时)	输出端	$2.0U_d$
		直流母线	$2.2U_d$
	避雷器放电	换流阀	$2.0U_{d1}$
直流线路	一极接地故障在健全极上引起过电压	输出端	$(1.7\sim 2.2)U_d$
		直流母线	$2.3U_d$
	断线故障	平波电抗器	$1.8U_d$
	操作波的传递	换流站内	$2.5U_d$

不接地。这些特点给直流避雷器的研制带来了技术上的困难，所以直到 20 世纪 60 年代才制造出合格的碳化硅直流避雷器。

70 年代以后发展起来的金属氧化物避雷器，给直流输电系统的过电压保护带来了新的前景。对直流避雷器所提出的技术要求是：非线性好、灭弧能力强、通流能力（耗能容量）大、结构简单、体积小、耐污染能力强，这些正好是氧化锌无间隙避雷器所具有的突出优点。在直流输电系统中，金属氧化物避雷器是更接近于理想的过电压保护装置，因而正在逐渐淘汰传统的碳化硅有间隙避雷器。（见换流站避雷器）

### 参考书目

〔瑞典〕乌尔曼著，直流输电，张金堂等译，北京：科学出版社，1983

（Uhlmann E. Power Transmission by Direct Current, Springer - Verlag, 1975）

（赵智大）

zhiliu shudian xitong jisuan

**直流输电系统计算**（computation of DC transmission system）

运用模拟仿真的硬软件，对直流输电及有关交流电力系统进行稳态和暂态过程的计算分析，推求系统有关变量的数值解，以至于确定有关参数和变量间的函数或数值关系。它既可再现实际运行中的稳态和暂态过程，也可实现设想的状态和过程。其目的是：在规划设计中正确选择电源布点和网架形成以及有关设备参数；在运行调度中决定合理的运行方式；制定事故处理和预防的技术措施，以提

高交直流电力系统安全性和经济性。

现代电力系统在物理结构方面的特征是大电网、大机组和交直流超高压输电。反映在数学方面的特征则是多变量、变参数、变结构和非线性的大系统。其中有大量的发电、输配电和用电设备同时接在一个系统中运行，而且整个系统有功和无功功率的生产和消耗时刻保持着平衡，所以交直流电力系计算甚为复杂，工作量巨大。

有了运用数字计算机进行交流系统分析的经验，对进行直流输电和交直流电力系统数字模拟是很有利的。与其它的模拟方法相比，其主要优点为：①数字计算机的内存一般不难容纳成百上千个节点的大系统计算，因此交流电力系统部分无须过多简化，以免影响分析计算结果；②通过人机对话能简便地改变参数值、变量的限定值和初值，以至于增加一些子程序；③对大系统而言，一般微机的计算速度也是有限的，难以达到实时的目标，必要时可采用大型计算机，则实时的目标也不难达到。

直流输电和交直流电力系统的数字模拟按计算的目的和数学方法的不同主要可分为：潮流计算、小扰动下的稳定计算和大扰动后的稳定计算三类。另外还有电磁暂态过程计算也是交直流电力系计算的一个重要内容，它主要用于过电压和过电流等快速变化的电磁暂态过程的计算。

**潮流计算** 潮流计算的目的是求解电力系统稳态运行状态。交流电力系统潮流计算程序已很成熟，加上直流输电部分的潮流计算子程序，即可得到实现交直流交替计算的软件。交直流两部分的分割点一般选取在换流站的交流母线，称之为交流系统中的直流节点。在此节点一般接有交流滤波器，因而这节点的电压波形可视为正弦波，是交流系统为直流部分提供的换相电压。每个换流站中各换流单元在交流母线上注入复功率的总和作为直流节点的负荷。

**交流系统潮流计算数学模型** 根据给定的电力系统主接线、设备和线路参数以及各节点的给定运行条件，即给定各节点的电压相量  $U_i e^{j\theta_i}$  和注入复功率  $(P_i + jQ_i)$  的四个变量  $(U_i, \theta_i, P_i, Q_i)$  中的两个，计算结果得到各节点的余下两个变量以及各支路的功率分布。

潮流计算常用的数学模型为节点导纳型的网络方程，即

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j = \dot{I}_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中导纳矩阵具有稀疏的特点。同时，节点电压不用复数量而用极坐标量，这些都有利于求解。式（1）的相应节点功率方程为

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j = \frac{P_i - jQ_i}{U_i} = \frac{\dot{W}_i}{U_i} = \dot{I}_i$$

$$(i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中  $n$  为网络节点数;  $i$  与  $j$  均为节点序号; 用  $P_i$ 、 $Q_i$ 、 $U_i$  和  $\delta_i$  四个变量表明各节点的运行条件。它可以分成三类: ①电源节点。给定  $P_i$  和  $U_i$  值, 称 PV 节点, 其中  $P_i > 0$ , 其余两个量待求。②负荷节点。给定  $P_i$  和  $Q_i$  值, 又称 PQ 节点。其中  $P_i < 0$ , 有功无功功率都按计划发出的电源也可属这类节点, 但  $P_i > 0$  即作为负的负荷。电网支接(或开关站)节点, 无注入功率, 即给定  $P_i = 0$  和  $Q_i = 0$ 。③平衡节点, 一个系统一般只设一个。在潮流决定之后, 该节点注入复功率等于全部电源发出的总功率减去各负荷消耗总功率和网损功率总和所余的差值。通常选择主调频发电厂作为潮流计算时的全系统功率平衡节点, 也给定两个量  $U_i$  和  $\delta_i$ 。如果平衡节点也作为相位角基准, 即一般取  $\delta = 0^\circ$ 。潮流计算用数学模型的特征是  $n$  个非线性复数方程组, 相当于  $2n$  个非线性实数方程。总之, 全系统如有  $n$  个节点, 相应地共有  $4n$  个变量。按上述运行条件每个节点给定 2 个节点变量值, 共给定  $2n$  个节点变量值, 可用牛顿-拉夫逊法求解余下的  $2n$  个待求变量值。

**交直流交替迭代计算** 换流站交流滤波装置与主电路连接点即直流节点, 当滤波装置设计正确而且运行正常时, 此节点的电压可看作为正弦的, 供给换流单元作为换相电压。在换流站直流节点间所界定的部分是直流输电系统部分, 其中换流设备和直流线路是按换流和直流电路原理工作的, 虽然换流变压器和交流滤波器存在着交流分量, 但它不是单纯的基频正弦电路。而其余的交流系统部分是按三相基波正弦交流电路的规律工作的。交流系统到直流节点为止。在直流节点上接有复数负荷代表直流输电系统向交流系统注入的基波复功率, 在交流系统潮流计算中列于 PQ 节点一类。在整流端  $P_i < 0$ , 逆变端  $P_i > 0$ 。直流输电换流过程中都消耗无功功率, 即  $+jQ$ ,  $Q > 0$ 。

在交替迭代之前, 应给定有关变量初值。直流输电部分计算结果为交流系统部分计算提供直流节点的注入功率。接着进行交流系统潮流计算, 为下轮直流输电部分计算提供直流节点的基波正弦交流电压相量。再进一步用新提供的电压相量作为换相电压进行新一轮的直流输电系统计算, 求出接在直流节点的负荷功率。如此往复交替计算, 直至计算结果的数值收敛到合乎规定时, 就完成了交直流电力系统的潮流计算。

**小扰动稳定计算** 又称静态稳定计算, 其目的是计算和评估交直流电力系统在受到微小扰动下保持在稳态运行点工作的能力。在实际的电力系统中, 这种扰

动是无时不有的, 例如负荷功率发生正常的微小变化等。这种扰动可看作随机的无限小量。因而有关的非线性数学模型均可在原来的运行点及其无限小邻域内加以线性化。这种计算的数学特征是求解经线性化后的微分方程组特征根, 并按其实部是否有一定负值以判别稳定与否。求解大系统特征根的工作量大而繁, 但有不少方法可用特征方程中各次项的系数按一定规律运算的结果作为稳定性的判据, 例如罗斯-胡尔维茨判据。此外, 还有  $dP/d\delta$ 、 $dQ/dU$ 、 $dP/d\delta$  等静态稳定实用判据。交直流系统在小扰动下稳定计算的数学模型可分为直流主电路、交流系统的等值电路和直流控制系统三个部分。将各部分数学模型整理后, 可得整个系统的状态方程。以整流端定直流电流控制逆变端定关断角控制的两端直流输电为例, 其状态方程如下。其中状态变量  $A = \cos\alpha$  为整流端触发角的函数。 $I_{d1}$ 、 $I_{d2}$ 、 $U_c$  分别为两端直流电流分量和线路中点的直流电压。变量符号上的圆点表示该变量对时间的微分。

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta I_{d1}} \\ \dot{\Delta I_{d2}} \\ \dot{\Delta U_c} \\ \dot{\Delta A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & -\frac{1}{L_1} & k_{14} \\ 0 & k_{22} & \frac{1}{L_1} & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & 0 & 0 \\ K_1/T_1 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{d1} \\ \Delta I_{d2} \\ \Delta U_c \\ \Delta A \end{bmatrix}$$

状态方程中的系数矩阵可供判断系统是否稳定之用。也可以通过控制系统  $K_1$  和时间常数  $T_1$  的选择来改善系统小扰动下的稳定性。

**大扰动稳定计算** 又称暂态稳定计算, 其目的是评估交直流电力系统在一定形式和量值的大扰动后, 系统内同步电机恢复同步运行的能力, 进一步评估大扰动对系统可用率的影响, 是否需要采取措施将可用率提高到可接受的水平。

交直流电力系统中的大扰动主要有: 发电机故障从系统退出工作、直流输电换流站因故障全部或部分退出运行、变压器和线路故障并切除、大负荷的切除和投入。线路故障有各种方式的短路、断路以及复合故障。

发生大扰动的概率虽然很小, 但其过程相当急剧, 有关变量变化很大。因此一般不能采用非线性微分方程的线性化方法求解。过程计算历时较长, 往往要计及励磁系统的自动调节、电力系统稳定器、自动调速系统, 以及直流输电控制系统的行为。它们的数学模型都是微分方程组。

**数学模型** 其中电力网络数学模型也采用节点纳型的电路方程, 但与潮流计算所采用的状态方程不同, 要增加电源支路及其参数和电动势。大扰动稳定计

算比小扰动的计算工作量更大而且更为复杂。为了简化,在大扰动稳定计算中略去不计旋转电机定子回路和电力网络中发生的电磁暂态过程,而且当发生不对称故障时,也不计其中的负序和零序分量,只考虑正序分量受不对称故障的影响,仅在正序网故障点接上负序和零序等值阻抗。可用电力网络线性或非线性代数方程组、描述电机转子运动方程、描述自动调节环节和直流输电的控制系统中过程的微分方程组作为数学模型,并据此求解。

**算法** 大扰动稳定计算中用网络代数方程组和电机转子运动与自动控制环节微分方程组交替计算,必要时也可用两种方程组联立求解。实质上是一个求微分方程组数值解的问题。在解题之初,要对应于正常运行时的潮流计算求出微分方程组中状态变量的初值。

常用的计算机数值积分算法有:①显式积分的改进欧拉法。它比较简单、精确,但计算步长受到系统微分方程组中最小时间常数的制约。②隐式积分的改进欧拉法。它不受上述的制约,但迭代计算的次数多。③龙格-库塔法。它也是显式的,一般用四阶的精度已较高。龙格-库塔-梅逊法能按每步计算精度的核算,自动增减步长。④梯形积分法。采用离散伴随网络,属隐式,数值稳定性好。以上均属于单步法。⑤吉尔法。它是多步法中较好的一种。

当发生大扰动时,即开始用计算系统电磁暂态过程的方法计算系统中有关状态和过程。如果由于大扰动引起严重的非正常情况已基本消失,则可以改用准稳态法计算。准稳态算法就是换流器触发相位角、直流电压和电流尚未平稳下来,但为了简化,当换流器每触发一次之后,在后继的触发周期中(约为 $1/6$ 基频周期),使用稳态公式计算。如果控制系统参数选择适当,直流输电系统将过渡进入稳态,此后即可用正常稳态的公式计算。

**发展简况** 随着交直流电力系统计算分析的要求日益提高,以及模拟与仿真的硬、软件技术不断地进步,直流输电系统及交直流系统的计算正不断地更新和发展。①在对计算分析的要求提高方面,如:大容量发电机组长轴系扭转振动时,如果系统中有关部分发生相应的次同步振荡,就会使长轴系过分扭转而损坏,甚至殃及工程的其他设施,造成很大的经济损失。因此对此问题的分析计算必须从假定机组转子是整块刚体,进一步深入到认为长轴系是由多质量块和多节弹簧构成的。需要确定准确而简便有效的数学模型和计算方法,以便在系统规划的电源布点和网架形成过程中就进行核算和评估,以避免次同步振荡的发生。又如三相重合闸对机组轴系冲击比较大,因而需要对非全相故障和重合闸作更细致的计算与研究。②软件方面,

交直流电力系统的三类计算机软件都已逐渐成熟,有的已作为程序模块纳入规划程序和软件包中。如果仿真语言开发成功,进行数字仿真将更有利于分析计算。③硬件方面,采用配备有微处理机阵列、能并行计算的大型计算机,以提高计算速度,必要时可实现实时计算。也有配备专用的微机,以减少机时,提高工作效率和功能价格比。

#### 参考书目

西安交通大学等,电力系统计算,北京:水利电力出版社,1978

王梅义,吴竟昌,蒙定中,大电网系统技术,北京:水利电力出版社,1991

Arrillage J et al. Computer Modelling of Electrical Power Systems. New York: John Wiley & Sons, 1983

(戴熙杰 陈佐沂)

zhiliu shudian xitong jidian baohu

### 直流输电系统继电保护 (relay protection of DC transmission system)

反应直流输电系统设备的故障或异常运行状态并发出适当处理指令的自动装置及其技术。直流输电系统继电保护装置动作后,或发出报警信号,或作用于换流器控制系统,或发出指令使断路器跳闸,以消除直流系统的故障,使一次设备免受过电流、过电压、过热和过大电动力等危害,起着保证直流输电系统的可靠运行,防止事故扩大的重要作用。它与电力系统中所有的继电保护一样,应能满足快速性、灵敏性、选择性和可靠性的要求。它的任务包括故障检测和故障处理两大方面。故障检测用于鉴别被保护设备是否发生故障或处于非正常运行状态、故障的类型、轻重程度以及故障发生在保护区内部或外部。故障处理按其轻重程度可分为三个类型:①发生严重故障或非正常危险工作状态时,快速而有选择地使故障设备退出运行;②作用于控制系统,以消除故障或非正常运行状态;③发生轻度故障或短时允许的过负荷时,发出报警信号。直流输电系统继电保护装置有电磁型、集成电路型和微机型三种。微机型保护具有很强的自检功能、人机对话功能,容易实现多重化,而且体积小,故得到广泛的应用。

**特点** 直流输电系统的继电保护是由各个一次设备的继电保护构成的,与一般交流系统继电保护相比,它的主要特点是:少用直流断路器,换流器控制作用迅速,直流输电一个极能继续运行,而且要考虑谐波对继电保护的影响。

直流断路器用得少 到目前为止,两端直流输电系统主接线中,只在各换流变压器交流系统侧装设交流断路器,直流线路及其他直流设备均无直流断路器。

因此,当设备发生故障要求与系统脱离时,都要以断开换流变压器系统侧的交流断路器来实现。断开该交流断路器之前,先要发出指令给控制系统,使换流器触发脉冲紧急移相或投入旁通对,以免该断路器带负荷跳闸产生过电压。

换流器控制作用迅速 这种特性常用来配合继电保护处理或协助处理直流输电系统的故障,并可控制故障的发展。例如直流线路发生短路故障时,通过换流器触发脉冲紧急移相,使直流线路快速去能,熄灭故障处电弧(相当于交流线路跳闸)。对于直流架空线路,经过一段去游离时间后,可使直流输电系统自动再启动(相当于交流线路自动重合闸),还可以方便地实现多次自动再启动(相当于交流线路多次重合闸),而且最后一次再启动还可降低直流电压运行。另外,换流器控制系统具有一些防止故障扩大、减轻故障有害后果的功能,例如:定电流控制能抑制直流短路电流,防止直流过负荷;采用低压限流控制时,能提高交流系统故障期间运行的稳定性,故障切除后能使直流系统迅速恢复正常运行。(见直流输电系统控制)

直流一个极能继续运行 双极直流输电要求每个极都具有独立的继电保护。这样,当一个极因故障或检修退出运行时,另一极仍可正常运行。一般可送双极额定功率的一半或以上;并可利用一极的短时过负荷能力,在给定的时间内允许送更多的功率,以提高系统的可用率。

考虑谐波对继电保护的影响 换流器运行时会在交直流两侧产生一系列谐波电流和电压。发生故障时的暂态过程的准谐波分量将更大,还会出现非特征谐波。同时,由于交流谐波滤波器的参数是按稳态要求设计的,对暂态谐波的滤波能力有限。因此,当发生故障时将有较大的谐波电流流入交流电力系统,从而要求换流站内及其附近的交流和直流系统继电保护具有抗谐波影响的能力,即要求各种继电保护动作整定值和动作时间不受谐波影响,或影响程度不超出允许范围。

直流输电继电保护配置 由各极的换流变压器保护、换流器(桥)保护、直流开关场设备保护、交直流

滤波器保护、直流线路保护以及接地极引线保护等构成。图 1 所示为换流站一个极设备及线路保护系统的框图。其配置原则要求相邻设备的保护范围有所交叠,达到全面覆盖,不可出现保护死区;配有后备保护以补充不足和保证工作可靠。

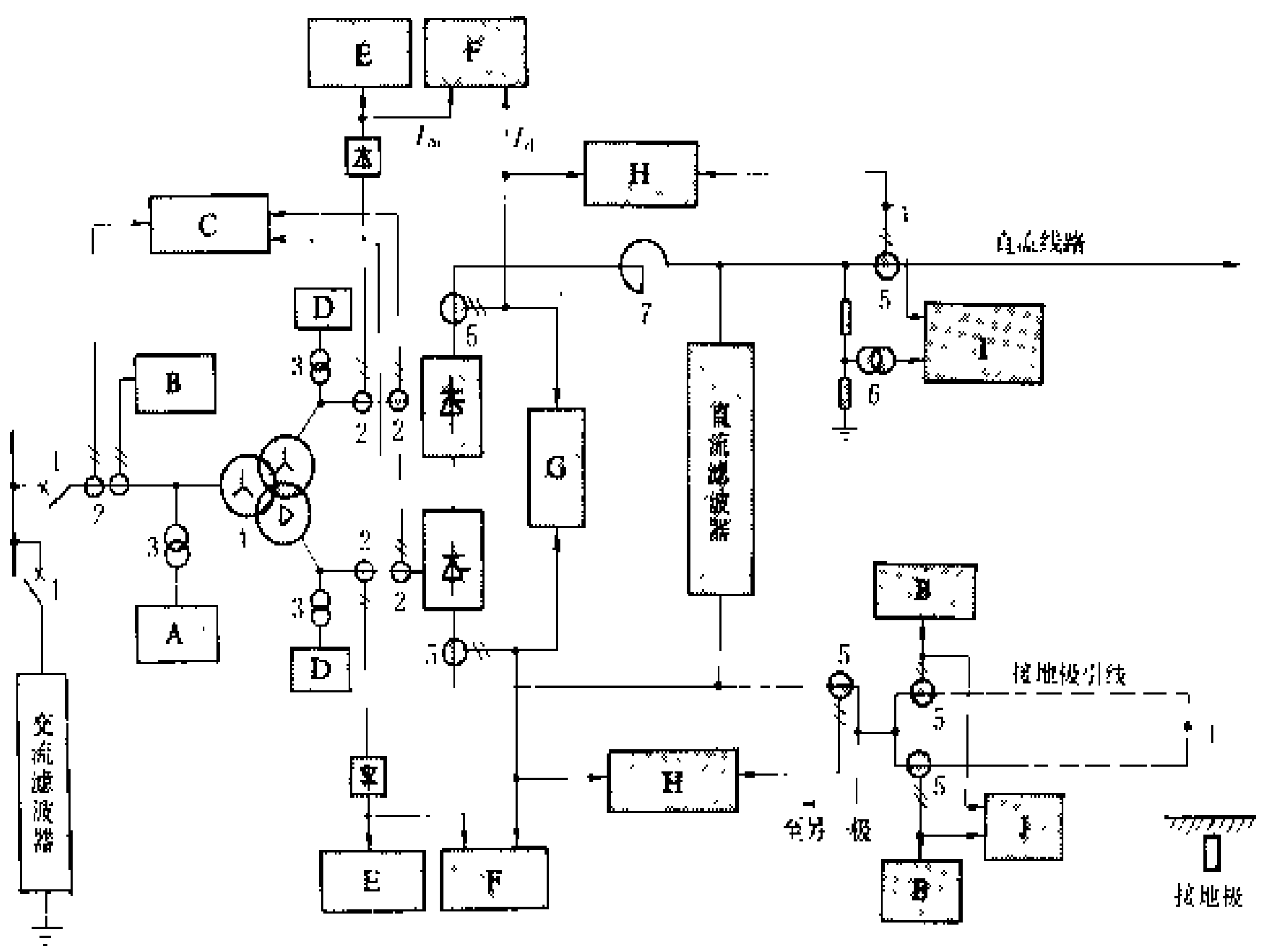


图 1 直流输电系统继电保护配置示意图

1—交流断路器; 2—交流电流互感器; 3—交流电压互感器; 4—换流变压器; 5—直流电流互感器; 6—直流电压互感器; 7—平波电抗器  
A—过电压保护; B—过电流保护; C—变压器差动保护; D—欠电压保护; E—换流桥过电流保护; F—换流桥差动保护; G—极差动保护; H—直流开关场差动保护; I—直流线路保护; J—接地极引线横差动保护

换流变压器保护 通常设有差动保护、过电流保护、过电压保护及瓦斯保护等,这些保护都动作于断开交流断路器(见图 1)。差动保护和过电流保护的原理与一般电力变压器的保护相同,但要考虑谐波电流的影响,保护中避免采用谐波制动。延时过电流保护的範圍应包括换流器。过电压保护用于交流稳态过电压保护、直流甩负荷时可能出现的动态过电压保护。

换流器保护 一般设有换流桥交直流差动保护、极差动保护、过电流保护、欠电压保护和阀体保护等(见图 1)。这些保护动作时先使换流器紧急移相或投入旁路对,然后断开交流断路器。

(1) 换流桥交直流差动保护。简称桥差保护。十二脉动换流器的上桥和下桥各设一套。换流器正常运行时,交流侧电流互感器输出经三相电流整流并经整定之后得  $I_{ac}$ ;它与直流侧电流互感器输出  $I_{dc}$  相等。换流桥运行于整流状态,当发生桥臂短路和内部接地等故障时,将导致  $I_{ac} > I_{dc}$ ;运行于逆变状态的换流器发生换相失败或阀不触发等故障时,会出现  $I_{dc} > I_{ac}$  的情况。换流桥差动保护就是根据以上原理构成的。对于

$I_{ac} > I_{dc}$  类型故障, 要求保护瞬时动作; 对于  $I_{ac} < I_{dc}$  类型故障, 则希望保护延时动作, 一般延时取值 200 ms 左右。以躲过能自行恢复的换相失败故障。

(2) 换流器极差动保护。换流器直流侧两端直流电流差动保护, 主要用于保护换流器的接地故障。

(3) 换流桥交流过电流保护。设有速断和延时过电流保护, 后者作为换流器、直流开关场设备及高压直流线路的后备保护。

(4) 交流欠电压保护。用于保护换流器解锁(加触发脉冲)前换流器内部的接地故障, 例如接地线未撤除等。在换流变压器合闸充电时, 换流器仍处于闭锁状态, 如果换流器内部存在接地故障, 这时不会出现故障电流, 但相应的相电压将下降。欠电压保护应在换流变压器合闸时投入, 换流器解锁前自动退出。

(5) 阀体保护。主要有晶闸管元件故障(击穿)保护, 要求能显示故障元件的编号和总个数。当少量元件故障时一般只发出报警信号, 故障元件个数超过元件裕度时才作用于停运。此外, 还设有阀组件直流电源失压、阀冷却介质压力、温度、流量等保护。

直流开关场设备保护 在高压极线侧和中性线侧分别装设开关场设备差动保护, 用来保护平波电抗器、直流测量设备、直流隔离开关与其间连接导线以及直流滤波器和隔离开关等设备接地故障。保护动作时使换流器紧急移相或投入旁通对, 然后闭锁换流器触发脉冲。

高压直流线路保护 要求主保护具有全线速动性能, 并能区别线路末端短路和逆变器换相失败故障。满足这些要求的保护主要有直流线路纵差保护、行波保护和直流电压变化率保护等。纵差保护具有优良的选择性和灵敏度, 能保护线路接地故障以至于高阻接地的故障, 但要依靠通信设备传送另一端线路的电流信号, 因而延迟了保护的動作时间。行波保护根据线路送端或受端电流和电压在很短一段时间内 ( $< 10\text{ ms}$ ) 的瞬时值而动作, 不需要远动通信设备, 因而动作速度快, 但对高阻接地故障灵敏度不够。直流电压变化率保护是根据线路始端直流电压下降的速度动作, 对于线路高阻接地故障, 由于电压下降速度慢, 保护可能失效, 有时加上长时限的直流低电压保护作为后备保护, 以弥补不足。另外, 双极性线路中一极故障时, 非故障极线路会感应出较大的电压变化速率, 要附加电压闭锁环节防止误动作。对于直流架空线路, 保护动作起动“换流器紧急移相—等待弧道去游离—自动再起动”处理程序。去游离时间一般取 100~500 ms, 采取多次再起动时, 去游离时间可逐次增大, 最后一次再起动还可考虑降低电压运行。如果最后一次再起动仍然失败, 则换流器紧急停运。直流电缆线路故障一般是永久性的,

因而不采用自动再起动。有较大延时的直流低电压保护动作时不自动再起动。

接地极引线保护 接地极引线一般采用二根平行导线构成(见图 1), 以便应用灵敏度较好的横差动保护。此外, 还设过电流保护, 防止过负荷。

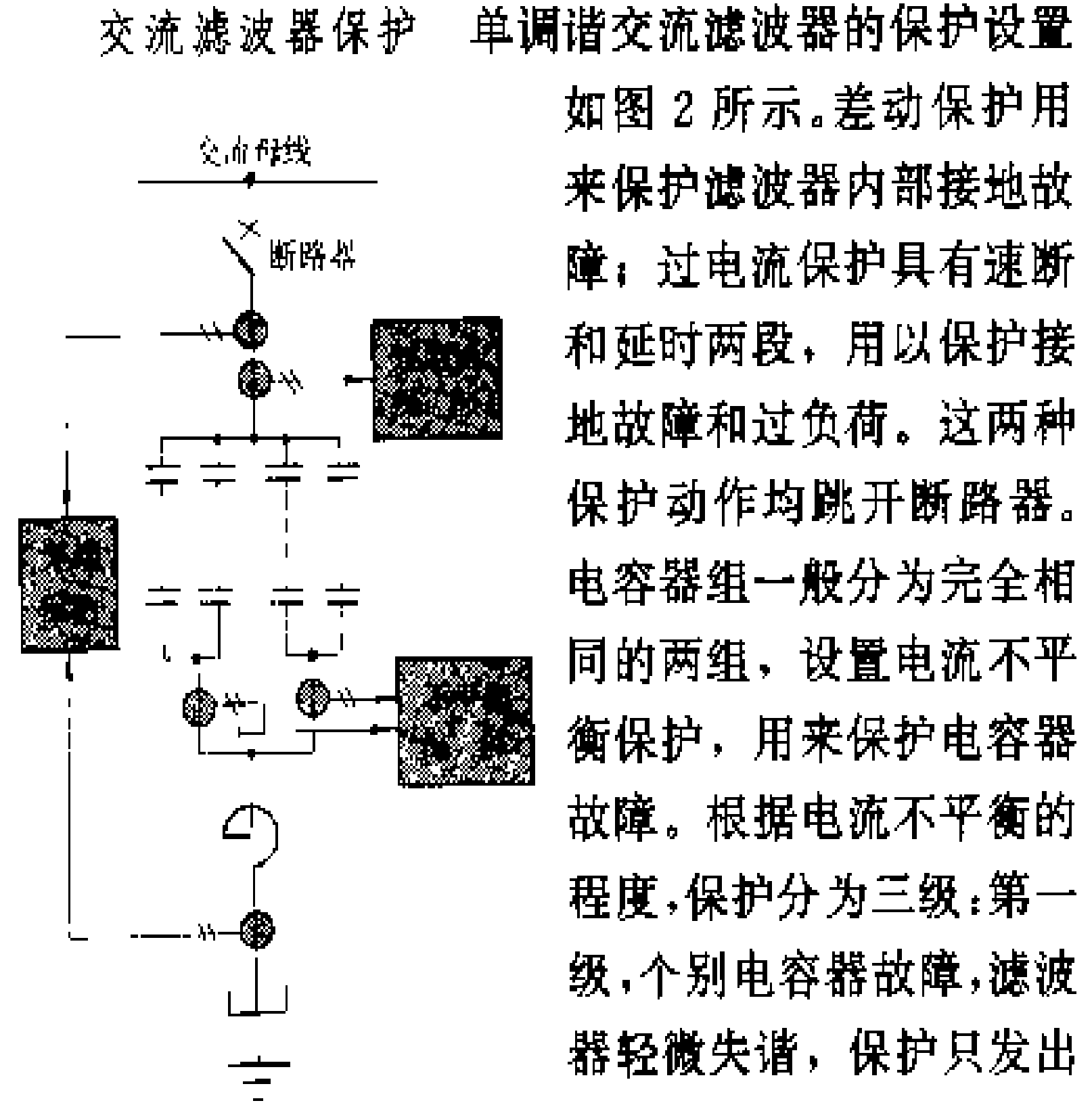


图 2 交流滤波器保护 单调谐交流滤波器的保护设置如图 2 所示。差动保护用来保护滤波器内部接地故障; 过电流保护具有速断和延时两段, 用以保护接地故障和过负荷。这两种保护动作均跳开断路器。电容器组一般分为完全相同的两组, 设置电流不平衡保护, 用来保护电容器故障。根据电流不平衡的程度, 保护分为三级: 第一级, 个别电容器故障, 滤波器轻微失谐, 保护只发出报警信号; 第二级, 多个电容器故障, 但仍允许滤波器短时运行, 保护延时 1~2 h 跳开断路器; 第三级, 故障电容器的个数更多, 保护立即跳开断路器。双调谐滤波器和高通滤波器的保护与单调谐滤波器的类似。

直流滤波器保护 正常运行时直流滤波器只流通谐波的交流电流, 其大小与直流系统运行状态有关。当电容器故障滤波器失谐时, 可能谐波电流反而减少。另外, 当直流系统起动滤波器充电时, 会出现涌流。设置直流滤波器保护时必须考虑上述特点。一般装设有差动保护和电容器组不平衡保护, 其原理与交流滤波器的相似, 但要具有躲过充电涌流的能力。保护动作时, 起动“换流器紧急移相或投入旁路对-闭锁触发脉冲”处理程序。

(蓝毓俊 吴国炎)

zhiyu shudian xitong jueyuan peihe  
**直流输电系统绝缘配合** (insulation coordination for DC transmission system)

为使绝缘故障率降低到经济上和运行上可以接受的水平, 综合考虑直流输电系统中可能出现的过电压、保护装置的特性和设施的绝缘特性, 以合理地确定各种设备与设施的绝缘水平为主要内容的过电压防护与绝缘的综合设计。按设计对象来分, 直流输电系统绝缘配合包括直流输电线路的绝缘配合和换流站的绝缘配合。

直流输电线路绝缘配合 如为直流架空线路, 其主要内容为: 选择线路绝缘子串应有的绝缘水平, 选定



线路绝缘子的型式与片数，塔头空气间距的绝缘配合等；如为直流电缆线路，其主要内容为：选择直流电缆本体及附件的应有绝缘水平。无论是哪一类线路，其绝缘水平均应同时满足线路上出现的长期工作电压、内部过电压和雷电过电压三方面的要求。

换流站绝缘配合 其主要内容为：过电压防护措施与保护接线的确定，各避雷器特性参数的选择，各种换流站设备绝缘水平的确定。

确定换流站过电压防护措施和选择避雷器配置方案的原则是：①交流侧产生的过电压应尽可能在交流侧加以限制，就地解决，这主要依靠接在交流母线上的避雷器来实现。这样做可以减轻串联换流阀对过电压的放大（累加）作用所造成的后果；②对于从直流侧侵入换流站的过电压，应预先由直流线路避雷器、直流母线避雷器和中性母线避雷器来加以限制；③由于换流站内各种设备所受到的电应力差别很大，各点的对地电位也各不相同，因此不能像交流变电所那样用一组或若干组规格相同的避雷器来实现对各种设备的保护。

避雷器特性参数和换流站设备绝缘水平的选择原则，应分别按采用碳化硅有间隙避雷器和采用金属氧化物无间隙避雷器两种情况考虑。①碳化硅有间隙避雷器与绝缘配合密切有关的特性参数为：灭弧电压、最大雷电冲击放电电压、最大操作冲击放电电压、残压、高能放电时的总电压降。其中灭弧电压应该比避雷器安装点的最大电压升高略大，只有这样才能保证可靠的灭弧。在选择避雷器的保护特性时，首先应求出稳态或暂态最大电压升高，据此确定该避雷器应有的灭弧电压水平，然后再求出其保护水平。②对金属氧化物无间隙避雷器，通常取其保护水平等于它在特定波形与幅值的冲击电流下的残压。典型的冲击电流波形有两种：8/20μs 冲击电流（对应于雷电波）和波前时间大于 30μs 的冲击电流（对应于操作波）。

高压直流换流站的绝缘配合一般采用惯用法，但对一部分外绝缘也曾作过采用统计法的尝试。在绝缘配合惯用法中，关键问题是选择绝缘裕度。国际大电网会议（CIGRE）所推荐的绝缘裕度值如表。

绝缘裕度推荐值

操作冲击	全部设备	15%
雷电冲击	晶闸管阀	15%
	其他设备	20%
陡波前冲击	晶闸管阀及其他设备	20%
	直流侧的空气绝缘装置（例如支柱式绝缘子、套管、隔离开关、直流滤波器及测量装置等）	25%

设备的基准雷电冲击绝缘水平（BIL）和基准操作冲击绝缘水平（BSL）可按下式求得

$$BIL = K_L \cdot [PL]_L$$

$$BSL = K_S \cdot [PL]_S$$

式中  $[PL]_L$  与  $[PL]_S$  分别为过电压保护装置在雷电波与操作波下的保护水平； $K_L$  与  $K_S$  分别为雷电冲击与操作冲击下的绝缘裕度系数（=1.0+裕度值）。

参考书目

CIGRE Working Group 33.05. Application Guide for Insulation Coordination and Arrester Protection of HVDC Converter Stations . In: Electra No. 96, 1984

（赵智大）

zhiliu shudian xitong kekaoxing

直流输电系统可靠性（DC transmission system reliability）

直流输电系统在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的能力。它以概率值表示，即用一定量的概率值来衡量可靠的程度。在不同的应用场合，系统“完成规定功能”的含意可能不相同。因此，对某个元件、设备，甚至整个系统的可靠性需要有具体的可靠性指标来定量地评估。适用于直流输电系统可靠性的指标通常有：①概率指标，主要有可靠度、可用率、不可用率等；②故障频率指标，即可修复元件或系统在所研究单位时间内的平均故障次数；③时间指标，主要有不可修复元件的平均寿命（即首次发生故障的平均时间），可修复元件两次故障间的平均时间（即平均工作时间），以及故障的平均持续时间（即修复时间）等；④期望值，在所研究单位时间（一般为一年）内发生故障的小时数期望值，由于故障减少供电量的期望值。应该说明：可靠性是对未来事件的预测，不可能有确切数值。上述四类指标都是建立在统计分析基础上的概率量。

直流输电系统是由各种各样元件、设备按选定的接线方式构成的，元件设备多，相应的发生故障次数也多。但是不能一概而论。如果一回双极带有回流电路的直流输电系统和一回三相交流输电系统相比，从全部停止送电的概率面言，直流输电系统的要比交流输电系统的少得多。这是由于前者可以用一个极导线和大地回流电路继续输送一半以上的电力，后者则不能持续非全相运行。如果具体条件变化，其结果也就大不相同。因此分析具体条件很重要。此外，当直流输电线路绝缘状况不良时，还可以降低运行电压，仍能输送一大部分电力，交流输电线路则难于做到。因此，在有的情况下，交流输电的可用率可能要比直流输电的低。如果深入考虑，直流输电系统与交流输电系统的差别还有：双极直流架空线路绝缘对任一极性的雷电具有不对称

的特性,大大减小了双极直流输电线路同时遭雷击而全部停止送电的概率;直流输电系统可以软起停,与全电压硬起动或交流线路重合闸相比,对发电机组轴系疲劳损耗小;交、直流输电引起次同步谐振的机制也不尽相同。

直流输电系统与交流输电系统的相比,技术装备主要是增加了换流器及其控制系统,由于近年来电力电子元件制造技术的进步和采用表决辨真伪、互为备用的控制系统,其可用率已高于实际工程可接受的水平。

历史发展过程 20 世纪 60 年代末期,以加拿大 R. 别林顿为代表,开创了直流输电系统可靠性的研究工作。此后,美国、日本等国也相继开展了这方面的研究。国际大电网会议(CIGRE)第 14 研究委员会已连续 20 多年对世界各国已经投运的直流输电系统可靠性指标作了大量的统计工作,并进行了可靠性分析。

与交流电力系统可靠性研究相比,目前直流输电系统可靠性研究尚薄弱,从成果的数量、质量和实际应用来看,都存在着相当大的差距。80 年代初期,中国也开始研究直流输电系统可靠性。根据马尔可夫过程的基本原理,为建立直流输电系统可靠性数学模型进行了理论基础研究;提出了高压直流换流站可靠性的评估方法;为了解决可靠性原始参数的不确定性,提出了可靠性评估的灵敏度分析法;对不同的备用模式策略和增强性措施也进行了研究,为可靠性决策提供了依据;继之,又进行了交直流并联输电系统可靠性的研究,并取得了阶段性成果;还研究了可靠性的评估约束和运算条件,提出了蒙特卡洛模拟法以及模拟法与解析法相结合的新的评估方法;建立了交直流并联输电系统计划检修期内风险度评估等若干实用算法。

学科研究内容 直流输电系统可靠性是一个新兴的研究领域,是把可靠性工程的一般原理和方法与直流输电系统中的具体工程问题相结合而形成的交叉学科分支。它具有科学性、应用性和普遍性三个特点。①科学性是指可靠性工程有一整套独特的科学理论和评估方法;②实用性是指它与工程实践紧密联系和结合,有明确的研究对象和应用目标;③普遍性(或连贯性)是指可靠性无所不在于元件、设备或整个系统的开发过程,不论在规划、设计、研制、制造和应用各阶段无不涉及可靠性问题。

直流输电系统可靠性研究的理论基础是可靠性数学,它是汇集了概率论、随机过程、统计学、运筹学以及系统工程有关概念和方法的一门边缘学科。近年来,各国学者都或多或少地应用模糊数学、大系统理论以及近代网络理论来研究新的可靠性模型和算法,这也是可靠性理论的发展趋势。

现代电力系统容量巨大,如果发生系统性重大事

故将引起大面积、长时间停电,不仅要造成巨大的经济损失,而且还会影响社会秩序安定。直流联络线是互联系统间可调节的联络环节,既能根据实际情况对发生故障的系统加以救援,也能加以隔绝以避免故障系统的事故波及健全系统而扩大停电范围。现代直流输电系统的输电电压、距离和容量都在增大,它本身的故障对整个电力系统可靠性也有所影响,因此定量评估和改善直流输电的可靠性指标更为重要。提高直流输电系统元件(换流设备、输电设备、滤波设备、控制设备等)的可靠性,是提高整个系统可靠性的必要措施。要用可靠性理论来指导直流输电系统工程实践的全过程。进行可靠性定量评估、可靠性分析和决策以及选择决定增强性措施,不仅具有理论意义,而且还有重要的实用价值。

具体评估方法 直流输电系统可靠性的具体评估方法主要有 LOLP 法、FD 法和蒙特卡洛模拟法。国际上主要采用 LOLP 法和 FD 法,而蒙特卡洛法是中国近几年才提出的新评估方法。

(1)LOLP 法。亦称概率分布法,主要是用来计算各种状态下的稳态概率分布。这种评估方法使用方便、灵活,但由于没有考虑状态之间的转移概率以及由此引起的可靠性逻辑关系所产生的影响,其计算精度较低,使用范围也就受到了一定的限制。

(2)FD 法。不仅考虑了各个确切状态或累积状态,而且还计及了状态之间的随机转移概率。此外,这种方法还可计及备用元件和元件安装过程对可靠性指标的影响。但在具体求解过程中,如果仍沿用递推法,在状态空间图的结构比较复杂时,求解过程就显得繁杂而冗长。

(3)蒙特卡洛模拟法。针对直流输电系统可靠性评估中系统结构复杂、运行方式繁多以及系统中的元件或子系统的状态并不完全独立等特点,而提出来的新方法。利用这种方法可在计算机上模拟随机出现的各种系统状态,并从大量的模拟试验结果中统计出系统的可靠性指标。由于模拟法所要求的随机模拟次数(即样本容量)与系统的规模无关,因此在进行直流输电系统以及交直流并联输电系统可靠性评估时,这种方法显示出明显的优越性。

(任 震)

zhiliu snudian xitong kongzhi

**直流输电系统控制** (control of DC transmission system)

为使直流输电系统能可靠、稳定和经济地运行并实现所要求的功能而采用的控制技术和装备。它是直流输电系统的一个关键组成部分。广义的直流输电控制包括:正常运行控制,继电保护系

统和故障控制,换流站内各种开关和其它设备操作的顺序控制,以及监测和通信系统。在此,着重于两端直流输电系统正常运行控制的功能、原理和特性。多端直流输电系统控制的原则基本与两端的相同。

**基本任务** 主要有:①控制各换流器和直流线路的直流电流、电压和功率,使之在给定的状态下稳定地运行,并具有良好的静态和动态特性;②保证换流器安全运行,防止逆变器发生换相失败,并在此基础上兼顾到系统运行的经济性,尽可能提高功率因数,减小无功功率补偿设备的容量,降低无功功率潮流引起的损耗;③借助于换流器触发角的调节,滤波器的分组投切,以及换流变压器分接开关的控制,尽量减少交流和直流中的谐波分量,并满足系统对无功的要求;④实现直流系统的起动、停用和潮流反转等运行操作的顺序控制;⑤故障保护对策控制;⑥与直流输电有关的交流系统所要求进行的控制,也称为高级控制,如直流输电功率控制或交流系统频率控制、换流站无功功率控制或交流电压控制、交流系统振荡阻尼控制和提高稳定控制等。其中第①、②、③项属基本控制的内容。

**控制手段** 有换流器触发相位控制、换流变压器分接开关控制和滤波器组与电容器组自动投切控制。

**换流器触发相位控制** 改变触发脉冲相对于换相电压的相位,即改变触发角。一般取交流滤波器连接点的电压为换相电压。这种控制手段能够快速地控制换流器的运行状态,是直流输电的主要控制手段,有时也简称为换流器触发控制。(见换流器触发相位控制)

**换流变压器分接开关控制** 用来调节加在换流器网侧的交流电压,同时与换流器触发相位控制相配合以实现给定的功能。由于分接开关切换较费时,因而属于慢速控制,主要用于经济性控制以及作为安全性控制的辅助措施。

**滤波器组与电容器组自动投切控制** 为了系统无功调节的需要,换流站的交流滤波器和无功补偿电容器一般均分组设置。控制系统可根据系统的无功情况,对滤波器组和电容器组进行自动投切的控制。

**控制方式** 根据控制任务和可能提供的控制手段,可实现的控制方式主要有:直流电流控制、直流电压控制、关断角控制、触发角控制和各种限值控制。

**直流电流控制** 采用偏差量反馈的控制,使换流器的直流电流等于整定值。通过电流整定值的调节,可以改变换流器和所连接的直流线路的电流或输送功率。如果直流电流整定值是恒定不变的,则称为定电流控制。通常还配以必要的限值控制,使稳态电流不超过技术要求的限值。直流电流控制是直流输电系统多种控制中最基本也是最重要的一种。它的响应速度最快,约三五十毫秒,能快速抑制过电流。其它变量的控制一

般用改变电流控制整定值来实现的,如定功率控制就是将功率整定值除以直流电压实际运行值,用所得的商作为直流电流的整定值。

**直流电压控制** 也是采用偏差量反馈的控制。当直流电压整定值是恒定不变时,则称为定直流电压控制。

**关断角控制** 逆变器的基本控制方式之一。采用预测(开环)控制、反馈(闭环)控制或两者并用,使关断角等于给定的关断裕度角,以防止关断角过小而发生换相失败故障,同时又要避免关断角过大而导致无功功率需求及其引起的电能损耗量和谐波分量的增加。

**触发角控制** 应用反馈控制使换流器的触发角等于整定值,也称为定触发角控制,可用于多端直流系统某些整流器的控制。对于整流器触发角一般采取延迟 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 触发的限制,以改善元件开通的同时性,避免阀中迟开通的元件受到过电压。

**限值控制** 有时简称为限制。使换流器的某个变量不超出给定值或给定范围的控制方式。例如最大和最小触发角限值控制,最小关断角限值控制等。此外,还有通过最大和最小限值的设定而实现的限值控制,例如最大和最小直流电流值或电压值的限制。

**基本控制** 利用直流电网的各端口换流器触发相位控制和换流变压器分接开关控制,实现直流系统电流和电压控制。两端直流输电系统的基本控制一般由一端控制直流电流,另一端控制直流电压,整个系统正常运行状态取决于这两种控制的整定值。通常,前一种控制设在整流站,后者则设于逆变站。在逆变器承担定直流电压控制的同时,一般还配以定关断角控制或最小关断角限值控制,以保证安全。

逆变器也设有定电流控制,它的整定值比整流器定电流控制的整定值小一个电流裕额,该电流裕额一般为额定电流的10%。为区别于整流器的定电流控制,称之为定减额电流控制。在非正常情况下,例如整流站交流电压过低时,其定电流控制因受最小触发角限制而不再有余量进行调节。为防止直流电流发生大幅度下降,在逆变器设有定减额电流控制之后,当电流小于它的整定值时,定减额电流控制即投入工作,其它控制都暂时退出。此时,则转为整流站控制直流电压,逆变站控制直流电流。

整流器的基本控制由最小触发角限制与定直流电流两段特性组成,而逆变器的基本控制则由定关断角、定直流电压与定减额直流电流三段特性组合而成。

应该指出,如果要改变运行的直流电流,两站的电流控制整定值要同步地改变,以防止电流裕额小于原定的数值而造成两站控制无法稳定运行。

**控制系统分层** 直流输电控制系统的任务繁多,宜作层次分明的安排,以便于硬件连接,运行操作和维护检修,并降低误操作的几率。分层结构的控制系统可靠性高。其层次可分为:主控制(也称系统控制)、双极控制(也称换流站控制)、极控制、换流器控制(也称换流单元控制)、单独控制和换流阀控制。其中换流阀控制是最基层的。当一个极只有一个换流单元时,极控制和换流单元控制则合二为一。(见直流输电控制系统分层结构)

**控制系统元件集成化的进展** 初期的直流输电使用由分立元件构成的模拟型控制系统。20世纪60年代后期,开始应用以集成电路为主的模拟和数字混合型的控制系统,其功能和可靠性均有显著的提高。从70年代中期开始,微型计算机控制应用于直流输电工程,首先用于阀元件的监测,以后逐步扩大到系统和极的控制,以至于极与换流器的控制,使直流输电的控制性能提高到新的水平。今后的趋势是开发以多微处理器为基础的分层、分布和多重化结构的控制系统,并应用最优控制和自适应控制技术,以进一步提高控制的功能和可靠性。

见换流器触发相位控制、直流输电控制系统分层结构、直流输电控制方式。

**参考书目**

戴熙杰主编,直流输电基础,北京:水利电力出版社,1990  
 Jotten R et al. Control in HVDC Systems, part 1: Multiterminal Systems. In: CIGRE Report 14-07, 1980

(吴国炎)

zhiliu shudian xitong qiting

**直流输电系统起停** (start and stop of DC transmission system) 直流输电的换流站和直流输电线路在控制系统作用下,从停运状态转变到运行状态,输送功率从零增加到给定值的起动过程以及从运行状态转变到停运状态的停止过程。停运状态可分为换流站主设备与电源隔离不带电以及主设备带电但不送电两种状态。带电是指换流变压器网侧绕组通过交流断路器合闸,接在换流站带电的交流母线上,换流阀则处于带电状态;不送电是指换流阀的触发脉冲未解锁,或已解锁但其触发相位尚未移到适当的位置,使直流回路中尚无电流存在。直流输电系统的起停包括:正常起动、全电压起动、正常停运、故障紧急停运和自动再起停等。

**正常起停** 直流输电系统正常工作时的起动和停运,包括换流变压器网侧断路器操作,直流侧开关设备的操作,换流器闭锁和解锁,直流功率按给定速度上升

到整定值或下降到最小值的全过程。为了降低起停过程中的过电压和过电流,以及减小起停时对两端交流系统的冲击,直流输电的正常起停均严格按一定的步骤顺序进行。

**正常起动** 其主要步骤为:①两端换流站的换流变压器网侧断路器分别合闸,使换流变压器和换流阀带电;②两端换流站分别进行直流侧开关设备的操作,以实现直流回路的连接;③在触发角 $\alpha=90^\circ$ (或大于 $90^\circ$ )的条件下,先解锁逆变器,后解锁整流器;④整流侧的电流调节器按起动过程中对直流电流变化规律的要求,逐步升高直流电流直至运行的整定值;⑤逆变侧的直流电压调节器(或关断角调节器)按起动过程中对直流电压变化规律的要求,逐步升高直流电压直至运行的整定值(或关断角整定值);⑥在直流电压和电流均升到整定值时,起动过程结束,直流输电系统转入正常运行。

正常起动过程的长短,一般由两端交流系统的承受能力来决定,可由几秒钟到几分钟。为了缩短在起动过程中直流电流发生间断的持续时间,电流调节器的整定值不是从零开始上升,通常取其开始起动时的整定值等于或略大于稳态直流电流的最小允许值,即可能发生间断直流电流最大值的2倍。在工程中通常取为额定直流电流的10%。

**全电压起动** 直流输电的一种不正常的起动方式,它是在逆变器未解锁时,整流器先行解锁。在这种情况下,由于逆变器未进入工作,直流线路末端开路,直流电流为零。整流侧电流调节器所取得的信号是测到直流电流小于其整定值,则很快将触发角 $\alpha$ 调到其最小值(一般取 $5^\circ$ ),直流电压则达到最大值。在末端开路的直流线路上,将可能产生2倍额定电压或更大的过电压。因此全电压起动在实际运行中应力求避免。为此,直流输电起动时必须先解锁逆变器,然后在确认逆变器已解锁的条件下再解锁整流器。

**正常停运** 其主要步骤为:①整流侧的电流调节器按停运过程中对直流电流变化规律的要求,逐步减小直流电流到其允许运行的最小值;②闭锁整流器的触发脉冲,或者将触发脉冲移相到 $\alpha=120^\circ\sim 150^\circ$ ,使整流器变为逆变器运行,延时20~40ms后再闭锁触发脉冲,此时直流电流和直流功率均为零,直流系统停运;③直流电流到零后,闭锁逆变器的触发脉冲;④两端换流站分别进行换流变压器网侧断路器的分闸操作,使换流设备均处于不带电状态;⑤两端换流站分别进行直流侧开关设备的操作,使直流线路与换流站断开。

**故障紧急停运和自动再起停** 直流输电系统在运行中发生故障,保护装置动作后停运称故障紧急停运。其操作要达到两个目的:一是迅速消除故障点的直流

电弧,二是跳开交流断路器隔离电源。为实现瞬时性故障消除后迅速恢复供电,直流输电系统也可采取自动再起启动措施。

**故障紧急停运** 其过程是迅速将整流器触发角 $\alpha$ 移相到 $120^\circ\sim 150^\circ$ ,也称快速移相。快速移相后,直流线路两端换流器都处于逆变状态,将直流系统内所储存的能量迅速送回两端的交流系统,当直流电流下降到零时,分别闭锁两侧换流器的触发脉冲,继之跳开两侧换流变压器的网侧断路器,达到紧急停运的目的。

当多桥换流器中只有一个或部分换流桥发生故障必须退出运行时,为了使其余部分仍可继续运行,可利用旁路阀和旁路开关,将故障部分隔离而退出工作。(见换流器旁路)

**自动再起启动** 与交流架空线路采用自动重合闸措施相类似,为了使瞬时性故障消除后能迅速恢复供电,直流架空线路故障后同样也可采取自动再起启动的措施。直流输电的自动再起启动是借助于换流桥控制的触发相位调节,逐渐提高直流电压和电流,使其恢复到故障前的水平。由于控制系统的快速作用,直流输电的自动再起启动时间一般比交流系统的自动重合闸时间要短,而且对两端交流系统的冲击也较小。(见直流输电系统自动再起启动)

(赵晓君)

zhi liu shu dian xi tong shu zi fang zhen

**直流输电系统数字仿真** (digital simulation of DC transmission system) 利用数字计算机作为辅助工具,按照原型的数学描述所建立的数学模型进行数值计算,以分析研究直流输电系统暂态过程的方法。与别的研究方法相比,数字仿真不影响原型的安全生产,节省试验研究费用,易于实现参数的变化,甚至在没有物理原型的情况下,也可以按人们构思的系统进行研究。但这种方法是根据人们的认识建立数学模型的,如人的认识有不完善之处,将会给分析研究的结果带来认识上的局限性。

直流输电系统的关键设备换流阀是一种电力电子开关器件,它不但具有强烈非线性伏安特性,而且周期性地开通和关断,使换流器的阀通断组态不断变动,表征系统电路图形的拓扑结构也随之发生变化。因此,直流输电系统数字仿真的主要特点为:①从过程总体而言是一个非线性系统;②在换流器的阀通断组态不变的每一时段内,仍可视为线性系统;③凭借于阀通断组态变化时刻前后状态变量的连续性,两相邻的线性时段得以衔接,从而可能完成直流输电中被研究课题的整个过程的计算和分析。其实质是采用分时段求解线性系统的方法,来完成非线性系统的计算。线性系统

求解方法也常用时域分析方法,分状态方程法和离散化模型法两类,都大致有建立数学模型、选用合适的计算方法、编出相应的程序和计算机上进行数值计算等步骤。

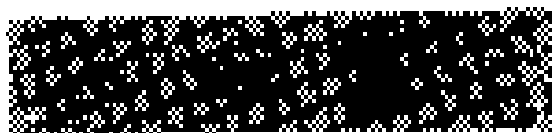
**数学模型** 状态方程法和离散化模型法的区别仅是对系统方程进行离散化处理的次序不同。离散化模型法是通过系统中的每个元件支路的离散化而形成整个系统方程的离散化,即由于局部的离散化而导致整体的离散化。而状态方程法对系统方程的离散化则是由于状态方程按步长的离散化计算而出现的。因此,这两种数学模型在本质上是一致的,即如果选用的数值积分公式相当,则两种数学模型所得的结果也是相当的。

**状态方程法** 用此法求解线性网络的步骤为:①根据描述单个元件特性的微分方程或代数方程导出描述整个系统状态的微分方程组,用一阶微分方程组表达时,又称状态方程;②选择适当的数值积分公式对微分方程组进行离散化处理,并形成相应的离散化代数方程组;③利用递推法求解离散化代数方程组,最终得到网络在一系列时间离散点上的数值解。状态方程法的特点是直观、明了,但通常因每次建立阀通断组态不变的时间段内的整个系统状态方程比较复杂,而显得不够简捷。

**离散化模型法** 实际上是将状态方程法求解步骤的次序加以颠倒。其步骤为:①先选择适当的数值积分公式,把描述单个元件支路特性的微分方程作离散化处理,形成单个元件的离散化伴随支路模型;②用单个元件的离散化伴随支路模型建立整个系统的离散化伴随网络;③通过对整个系统的离散化伴随网络的计算,得到某个时间离散点上的数值解;④利用已求得的解递推下一个离散时刻的单个元件离散化伴随支路模型;⑤重复②、③、④步骤,即可得到系统在一系列时间离散点上的解。离散化模型法的特点是将网络中所有储能元件等效为一个电导和一个与之并联的电流源,它体现着电路在这步计算之前的状态或“历史情况”,把网络的暂态分析转化为它的离散化伴随网络的直流分析。

由于直流输电系统中,只有换流器很少一部分电路经常发生周期性的电路通断变化,其余的直流和交流部分除了故障及其处理操作外不发生变化,因此可将整个系统分成为整流器和逆变器两个常变块和送、受端交流电网以及直流电网等不变块。离散化模型法与分块法结合,虽然块数增多但每一块阶数大减,故可以节省较多的机时。必要时,还可以并行地进行分块计算,以进一步节省机时。

**积分公式** 对数学模型精度起决定作用的是所采



用的数值积分公式。数值积分公式的选择应考虑到:选用的公式必须具有良好的数值稳定性,并且其局部截断误差也比较小。直流输电系统数字仿真中用的数值积分公式主要有龙格-库塔公式、梯形公式和吉尔公式等。

龙格-库塔公式是一种高精度的数值积分公式,但其数值稳定特性不是很好。龙格-库塔-梅逊公式是在龙格-库塔公式基础上发展成为能自动变步长以控制精度的计算公式。梯形公式是隐式的,是一种绝对稳定的数值积分公式,它的局部截断误差相对比较大,与分块法结合将更能发挥它的优点。吉尔公式则是一种线性多步的数值积分公式,精度随阶数的增加而提高,其一阶至六阶公式是稳定的。这几种数值积分公式都各有优缺点,应根据具体的仿真任务,选择合适的数值积分公式。

**程序和计算** 直流输电系统数字仿真的主要困难在于换流器的仿真。换流器通过其中换流阀支路有规律的通断获得所需要的直流电压和电流,其网络拓扑是不断变化的。处理换流器时变拓扑的方法主要有中心程序法、随用随算法以及这两种方法的混合使用。

**中心程序法** 这种方法试图列出所有可能出现的阀通断组态下的网络方程,把它们存储起来,以便在任何时候都能找到一组相应于某一指定通断组态的方程。这种方法思路比较直观,但它一般只能适用于交流系统为强系统的直流输电系统在正常运行方式下的仿真计算。因为故障运行时,阀通断组态繁多,要想列出所有阀通断组态下的网络方程,把它们存在计算机的内存中,以便随时调用是不现实的。中心程序法的另一种变形是状态变量轮换法,这种方法试图利用六脉动或十二脉动系统中对称变量的固有可轮换性,以减少状态方程的种类。

**随用随算法** 这种方法每当网络拓扑改变一次,相应地重建一次网络方程组。重建的方法各有不同,有的用变换矩阵导出各种组态下的网络方程,有的用分块法导出各种组态下的网络方程。

**运用** 直流输电系统数字仿真可用于交直流电力系统一般电磁暂态过程的计算,也可用于计算操作过电压和雷电过电压,并可计及金属氧化物避雷器的非线性特性。由于交直流电力系统的稳态波形实质上是每1/6或每1/12基波周期性重复一次的暂态过程组成的,所以数字仿真也用于交直流电力系统中谐波比较精确的计算。当系统中变量和参数对称时,计算结果中只有特征谐波。当系统中变量和参数不相等或不对称时,可求出非特征谐波的大小和相位。

**发展简况** 对高压直流输电系统数字仿真的研究,在国际上大约是从20世纪60年代中开始的,中国

开始这项研究工作也已有20多年,出现了许多数字仿真方法。目前正向着仿真方法和仿真程序的标准化方向发展。

参考书目

居梯编著,有源网络计算机辅助设计,北京:科学出版社,1986  
洪先龙等编著,计算机辅助电路分析,北京:清华大学出版社,1983

(何富发)

zhiliu shudian xitong xiebo

直流输电系统谐波 (harmonics of DC transmission system)

直流输电换流器的交流侧与直流侧的电流与电压中所存在的频率为换相电压基波频率整数倍的种种正弦分量。谐波与基波的频率之比称为谐波次数,它是个正整数。这些谐波的出现是由于换流阀伏安特性的非线性引起的。谐波的大小和相位可以从波形的傅立叶分析得到。在有关变量和参数完全对称或相等的工作条件下,产生的是特征谐波。如果不完全对称或不相等,除了有特征谐波之外,还会有种种非特征谐波。这些谐波对交流系统及其中设备,换流器本身,以及对邻近的通信系统都有不良影响和危害。往往需要采取措施加以疏导和抑制,使谐波分量能符合有关技术标准的规定。

**特征谐波** 假定条件:①作为三相桥式换流器换相电压的交流电源为三相对称的正弦基波电压;②换流器直流侧的电流为恒定的直流电流;③同一换流站内各换流变压器以及有关电路的三相参数相等;④每个换流桥的六个换流阀用稳定的、与基频同步的、等相位间隔的脉冲依次触发开通。在此理想情况下,换流器所产生的谐波分量的次数、幅值大小、对称平衡等方面都具有明显的规律或特征,故称为特征谐波。

**六脉动换流器的特征谐波** 其中换流变压器网侧特征谐波电流的次数为 $n=6k\pm1$ , $k$ 为任何正整数,即在交流侧有5, 7, 11, 13, 17, 19, ...等次谐波。其中 $n=6k+1$ 次三相谐波呈正序对称, $n=6k-1$ 次三相谐波呈负序对称。当不计换相过程,阀电流为 $120^\circ$ 基波电角度的矩形波时,第 $n$ 次谐波电流的有效值 $I_n$ 等于基波电流有效值 $I$ 的 $1/n$ 。计及换相过程时,特征谐波的次数及相序特性不变,但各次特征谐波电流的有效值与触发角及换相角有关。计及换相过程时,各次谐波电流均小于不计换相过程时相应各次的数值,这是由于换相过程中阀电流有逐渐上升和下降部分的存在,使交流侧的电流波形更接近于正弦。交流侧有谐波电流存在,必然也存在相应的谐波电压。

六脉动换流器直流侧特征谐波电压的次数为 $n=$

$6k$ , 即 6, 12, 18, 24, ... 等次。各次特征谐波电压的大小和相位与换流器交流侧换相电压、触发角以及换相角有关, 而换相角又与换相电流及换相阻抗大小有关。(见换相)

**十二脉动换流器的特征谐波** 一个十二脉动换流器是由两个相同的六脉动换流器组成的, 其运行的触发角和换相角彼此也相同。但两个换流变压器绕组接线方式不同, 分别为 Y, y 和 Y, d。两种不同接线方式的换流变压器分别为两个六脉动换流器提供两组幅值相等而相位相差  $30^\circ$  基频电角度的三相换相电压。在  $k$  为奇数的情况下, 两个六脉动换流器中, 次数相同的谐波分量, 大小相同相位相差  $180^\circ$  基波电角度而彼此抵消。当  $k$  为偶数时, 次数相同的谐波大小相等而相位彼此也相同。这两个六脉动换流器的换流变压器网侧绕组并联, 而换流器的直流端串联。在正常工况下, 交流侧只有 11, 13, 23, 25, ...,  $12k \pm 1$  ( $k$  为正整数) 等次特征谐波, 而直流侧只有 12, 24, ...,  $12k$  ( $k$  为正整数) 等次特征谐波。

为了给两个六脉动换流器分别提供一组三相换相电压, 而这两组换相电压的相位相差  $30^\circ$  基频电角度, 因而换流变压器的绕组数和接法、相数、台组可供选择的方案有: Y, y 与 Y, d 接法两绕组三相变压器各一台或两绕组单相变压器各三台, Y, y, d 接法三绕组三相变压器一台或三绕组单相变压器三台。方案的确定要考虑输送功率的大小, 运输条件以及备品等方面的因素。

**特征谐波在电力系统中的分布** 换流站交流侧的谐波电流流入交流系统后, 谐波电压和电流将在系统中分布开来。整流站和逆变站直流侧的谐波电压将施加于由平流电抗器、直流滤波装置、冲击波吸收电容等设备以及直流线路所组成的直流网络, 谐波电压和电流将在其中分布。为了计算这些谐波电压、电流的分布, 通常的方法是将换流站的各次谐波电流视为谐波电流源, 应用交流系统对应于各次谐波及相应相序下的等值网络分别求解。将整流站和逆变站直流侧的各次谐波电压视为谐波电压源, 应用直流网络在各次谐波下的等值网络分别求解。实际上施加于换流器的交流电压和换流器直流侧的电流中必将含有特征谐波分量, 从而使计算结果产生少量误差, 但特征谐波的次数及其相序和相位关系不受影响。要获得比较准确的计算结果, 可以采用统一计算交、直流系统中特征谐波潮流的方法。

**非特征谐波** 在各种非理想情况下, 换流站交、直流侧的电流和电压中, 除了特征谐波以外, 将出现其它次数的谐波分量, 称之为非特征谐波。通常考虑的非理想情况包括换流器交流侧三相电压中含有谐波分量、

换流变压器的三相参数不相等, 双桥的换流变压器参数不相等, 换流器触发脉冲相位间隔不相等以及这些情况的组合。对于前三种情况, 在交流侧只产生奇次非特征谐波, 在直流侧只产生偶次非特征谐波。对于最后一种情况, 在交、直流侧可能产生各种次数的非特征谐波。交流侧的非特征谐波一般三相不对称, 直流侧每极的非特征谐波电压和电流其大小也不相等。另外, 当存在非特征谐波时, 各次特征谐波的大小和相位关系也将有所改变。

对非特征谐波分布的分析计算方法之一是对各种因素单独考虑, 经过适当简化处理后, 计算出相应的交流侧非特征谐波电流和直流侧非特征谐波电压, 把它们分别视为谐波电流源和谐波电压源, 从而计算出在交流系统和直流网络中谐波电流、电压的分布。另一种方法是同时考虑上述因素进行统一求解, 但其计算过程比较复杂。

直流输电系统的特征谐波和非特征谐波也可以用 EMTF 和 FFT 程序来计算分析, 结果较精确, 但交流系统部分必要时可加以适当简化以节省机时。

**谐波危害** 直流输电系统所产生的谐波电压和电流, 对交流系统和换流器本身的运行, 以及对邻近的通信系统都将产生影响或危害。对交流电力系统的主要危害是: 使接于系统中运行的电机和电气设备, 在绝缘介质、导磁铁芯中以及导体中由于集肤效应等发生谐波附加损耗和发热; 电力系统可能对于某一谐波频率发生局部谐振, 使某一些设备受到过电压、过热甚至损坏。直流线路和有关交流线路的谐波电流和电压, 通过电磁和静电感应, 对邻近并行的通信线路引起相应谐波的噪声干扰。此外, 谐波对继电保护和自动装置的性能和动作, 对测量仪表的准确度可能产生影响。

早期的直流输电工程采用按相控制方式, 每个换流阀的触发角相等, 而各个阀的触发脉冲间隔则不一定相等。在换流器连接于弱交流系统情况下, 系统等值阻抗较大, 交流侧谐波电流特别是没有设置相应滤波装置的非特征谐波电流, 将使换相电压发生较大的畸变, 进一步使触发脉冲间隔更加不等, 造成恶性循环可能导致谐波不稳定现象, 因此要采用等间隔触发脉冲控制方式。(见换流器触发相位控制)

**谐波标准** 为了减少谐波的影响和危害, 不少国家已先后制订出谐波标准, 限制交流电力系统中允许的谐波含量。中国也于 1984 年制订了《电力系统谐波管理暂行规定》。各国的谐波标准差别较大, 但项目大体相同, 包括: ①对系统各点各奇、偶次谐波电压正弦波形畸变率的限制; ②对系统各点总电压波形畸变率的限制; ③对用户注入电力网的各次谐波电流有效值的限制。

**谐波抑制** 为使谐波电压和电流满足谐波标准规定的要求,往往需要对谐波进行抑制以减少谐波含量。从理论上说,增加换流器的脉动数,可以提高特征谐波的次数,从而有效地降低特征谐波分量。例如可以采用十八及以上脉动数的换流器,以进一步减小谐波。但由于换流变压器绕组接线和绝缘都比较复杂,制造费用以及备品都要增多,因此实际工程中还没有采用过。目前,在换流器交流侧抑制谐波的主要措施是装设换流站交流滤波装置以吸收谐波电流,使流入交流系统的谐波电流减小并从而降低谐波电压。在直流侧则主要利用平波电抗器来减少谐波。直流系统的谐波主要受限制于直流线路对通信的干扰,当不满足要求时,需设置换流站直流滤波装置。

抑制谐波还有一些其它措施,如磁通补偿、谐波注入、直流纹波注入以及采用特殊结构的直流线路等方法,但这些方法尚存在一些问题,有待研究,目前并未获得实际应用。

参考书目

浙江大学发电教研室直流输电科研组. 直流输电新一版. 北京: 水利电力出版社, 1985  
[苏] 波谢著, 直流输电接线及运行方式. 华北电力学院直流输电研究室译. 北京: 水利电力出版社, 1979

(夏道止)

zhi liu shu dian xitong yunxing texing

**直流输电系统运行特性** (operating characteristics of DC transmission systems) 直流输电系统稳态运行时的直流电流与直流电压间函数关系的表达式或曲线。根据整流器和逆变器的各种控制方式,直流输电系统的基本运行特性有五种:①整流器定 $\alpha$ 角-逆变器定 $\beta$ 角的运行特性;②整流器定 $\alpha$ 角-逆变器定 $\delta_0$ 角的运行特性;③整流器定直流电流-逆变器定 $\delta_0$ 角的运行特性;④整流器定直流电流-逆变器定直流电压的运行特性;⑤整流器定 $\alpha_0$ 角-逆变器定减额直流电流的运行特性。除此五种基本运行特性外,直流输电控制系统还可附加一些调节与控制功能,如低电压时降低或限制电流调节器整定值、定直流功率调节,交流系统频率与无功功率调节等,以进一步改善直流输电系统的运行特性,或用以满足某些特定的要求。

图1中直流输电线路用T型等值电路表示,所标的直流电压和电流都是稳态平均值。在稳态情况下,它们与主电路中的电感 $L$ 和电容 $C$ 无关。以图1中输电线路始端的S点为界,可写出S点两侧的稳态伏安特性方程式。

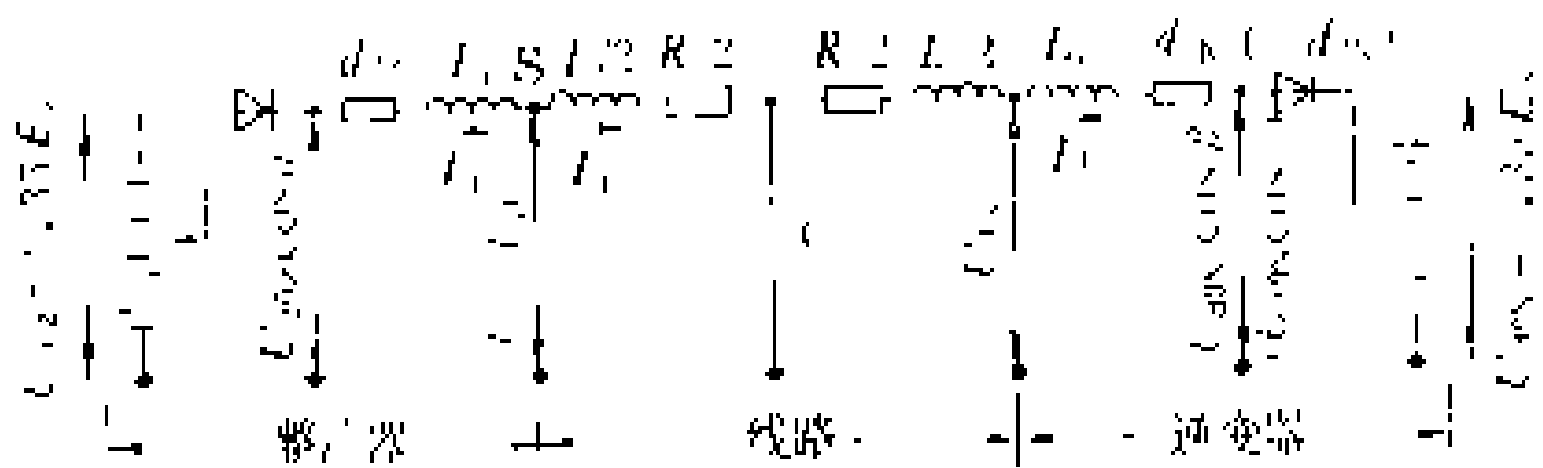


图1 直流输电系统等值电路  
 $L$ 、 $R$ 、 $C$ 为直流输电线路等值电路的电感、电阻和电容;  
下标Z和N分别表示整流和逆变侧有关的参量

(1) S点左侧,即整流器的伏安特性

$$U_d = U_{d0Z} \cos \alpha - I_d d_{rZ} \tag{1}$$

(2) S点右侧,即逆变器连同直流线路的伏安特性分为两种:

1) 当逆变器按定 $\beta$ 角运行时

$$U_d = U_{d0N} \cos \beta + I_d (d_{rN} + R) \tag{2}$$

2) 当逆变器按定 $\delta$ 角运行时

$$U_d = U_{d0N} \cos \delta - I_d (d_{rN} - R) \tag{3}$$

整流器定 $\alpha$ 角-逆变器定 $\beta$ 角运行特性 系统的运行状态由图2(a)确定。图2(a)中直线1是由式(1)确定的整流器定 $\alpha$ 角伏安特性;直线2是由式(2)确定的逆变器定 $\beta$ 角伏安特性。两直线的交点M是系统的稳态运行点。

由图2(a)可见,没有自动调节或只有定触发角开环调节的直流输电系统,其运行特性不好。例如整流器交流电动势从 $E_z$ 上升到 $E'_z$ ,则定 $\alpha$ 特性平行地移到1'位置,系统新的稳定运行点为A点,直流电流增大到 $I_{dA}$ 。同样,若 $E_z$ 下降到 $E'_z$ ,则稳定运行点移到B点。直流电流减小到 $I_{dB}$ 。由于直流输电系统伏安特性的斜率一般较小,交流电压变动不多,就会引起直流电流和直流功率很大的变化。同理,逆变侧交流电动势的变动,也会产生类似的结果。因此直流输电系统的整流器和逆变器两侧通常都装有自动控制设备,而且两者之间还有通信联系。

整流器定 $\alpha$ 角-逆变器定 $\delta_0$ 角运行特性 图2(b)中的直线1是整流器定 $\alpha$ 特性,直线3是由式(3)确定的逆变侧定 $\delta_0$ 特性,系统稳定运行点为M。分析结果与图2(a)相似,故这种运行特性也不好。如果受端电力系统太弱,比换相压降较大,因而 $d_{rN} - R > d_{rZ}$ ,即如图2(b)中的特性1和3'。当 $I_d$ 稍有增(或减)时,整流器电压将比逆变器反电压大(或小)得多,使 $I_d$ 恶性循环地增大(或减小),而无法稳定运行在M点。

整流器定直流电流-逆变器定 $\delta_0$ 角运行特性 整流器定直流电流特性如图2(c)和(d)中的直线AB。正常时,系统运行在整流侧定直流电流特性与逆变侧定 $\delta_0$ 特性的交点A。如整流侧的交流电压过低或逆变



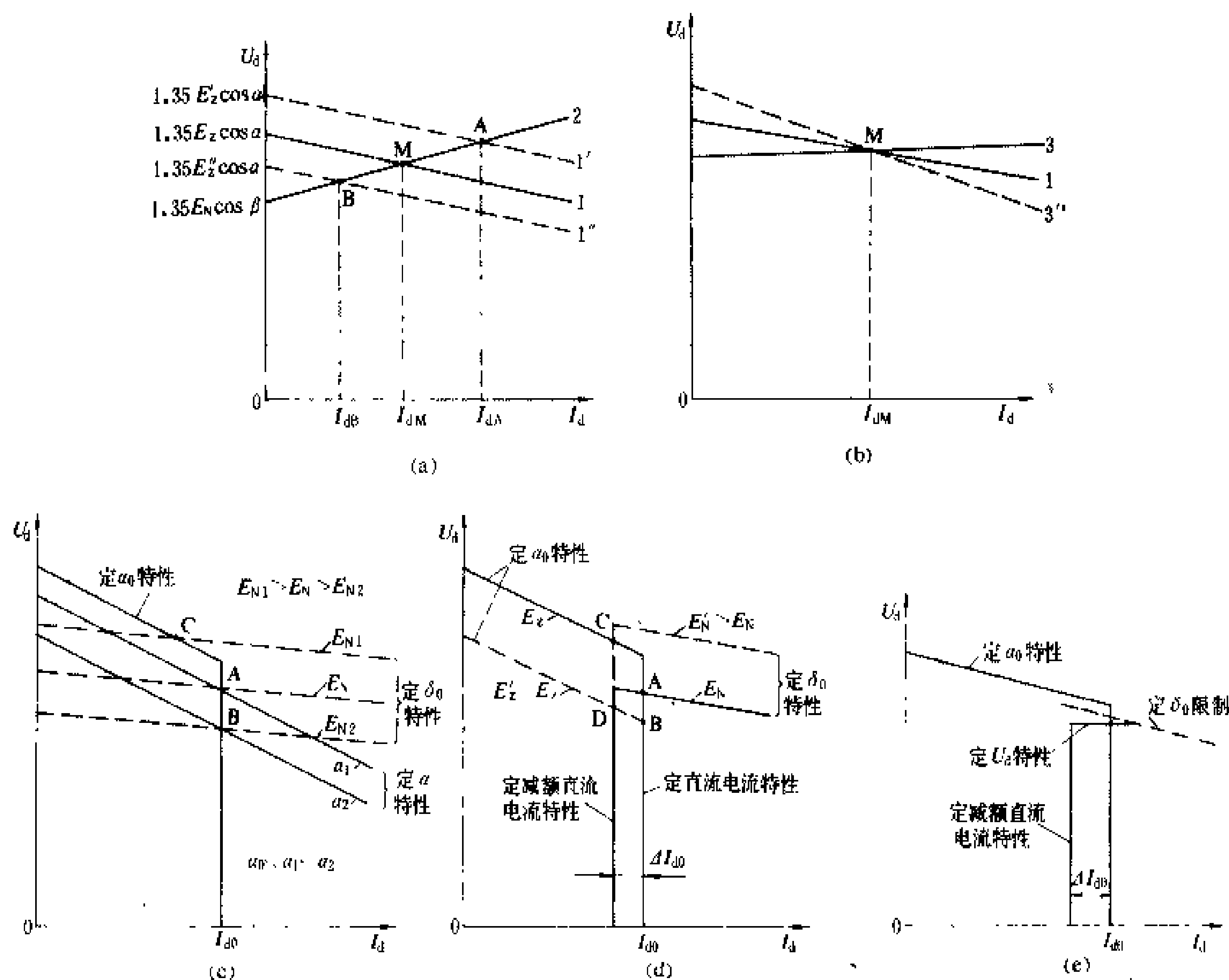


图2 直流输电系统的基本运行特性

(a) 整流器定 $\alpha$ 角-逆变器定 $\beta$ 角运行特性；(b) 整流器定 $\alpha$ 角-逆变器定 $\delta_0$ 角运行特性；(c) 整流器定直流电流-逆变器定 $\delta_0$ 角运行特性；(d) 整流器定直流电流-逆变器定直流电压运行特性；(e) 整流器定 $\alpha_0$ 角-逆变器定直流电流运行特性

1、1'、1''一定 $\alpha$ 特性；2--定 $\beta$ 特性；3、3'一定 $\delta_0$ 特性

侧的电压过高时，则转入逆变器定减额直流电流 $I_{d0}$ -整流侧定 $\alpha_0$ 特性的C或D点运行。

整流器定直流电流-逆变器定直流电压运行特性

如图2(d)所示，系统稳定运行点为A，这是正常运行时采用的基本运行特性。当受端为弱交流系统时，逆变器采用定直流电压运行，有利于提高换流站交流电压的稳定性。为了防止换相失败，逆变器仍需装设 $\delta$ 限值调节器，它只在 $\delta < \delta_0$ 时才进行调节。

整流器定 $\alpha_0$ 角-逆变器定减额直流电流运行特性

当逆变侧交流电压上升或整流侧交流电压下降较多，致使整流侧转入定 $\alpha_0$ 运行时，逆变侧即转入定减额直流电流运行，系统的稳定运行点分别移到C或D点，如图2(d)所示。逆变侧电流调节器的电流设定值比整流侧的小 $\Delta I_{d0}$ 。一般取 $\Delta I_{d0} = (0.1 \sim 0.15) I_{d0}$ ，故有定减额电流调节之称。

除了可利用换流器的触发角之外，还可以利用整流侧和逆变侧换流变压器的带负荷调压分接头来改变运行特性。但后者要通过机械动作来实现，需时达到秒级，比触发角调节慢得多，所以一般只能用于提高经济

性的调节。

(何富发)

zhiliu shudian xitong yunxing weihu

**直流输电系统运行维护** (DC transmission system operation & maintenance) 为维持直流输电系统中设备的完好状态，保证系统正常运行而实施的检查和维护保养工作。包括换流站运行设备的维护和直流输电线路的维护两个方面。

**换流站运行设备的维护** 其常规部分设备的运行维护内容见变电所运行维护。此外，还包括换流器的本体、冷却设备和空气调节设备，换流变压器，平波电抗器，直流控制调节装置，直流断路器，交、直流滤波器，直流互感器等设备的运行维护。

**换流器本体的维护** 现代的直流输电工程均采用晶闸管阀组成的换流器。由于设计中晶闸管元件留有裕度，少量元件损坏并不立即酿成事故。元件损坏的数量、损坏元件在换流器上的位置和触发系统的故障，一般均由元件故障检测装置显示。要保持该装置处于正

常运行的完好状态,并统计元件损坏的情况,便于安排检修计划。换流器是直流输电系统中元件最多而且最为重要的设备,通常成为定期检查维护的重点,必须建立详细的技术档案,配备必要的专用检测仪器和准备充分的备品,以尽量缩短维护工期。

**换流器冷却设备和空气调节设备的维护** 用于空气冷却换流器的空气调节设备,要定期清扫,并保持备用能力;对水冷却换流器,冷却水是换流器运行的必要条件,要监视和调整冷却水流量、温度和电导值在正常范围内;环境空气调节设备控制的温度、湿度要满足换流器运行的要求,并不致在换流器表面发生凝露;阀厅内空气应保持微正压,以免室外的灰尘等通过窗户缝隙进入阀厅。

**换流变压器的维护** 日常检查与常规电力变压器无大差别(见变压器维护检修)。由于换流变压器长期运行在有谐波分量的情况下,在定期检查中要注意对绝缘油中气体的分析,以判别内部有否谐波引起局部过热现象。换流变压器的有载调压开关动作频繁,要定期对动作回路和机械磨损情况进行检查,并及时过滤和更换绝缘油。

**平波电抗器的维护** 平波电抗器的结构较简单,日常维护主要进行外观检查。空冷式电抗器要定期清扫;油浸式电抗器在定期检查中,通过对绝缘油中气体的分析来判别有无局部故障。

**直流控制调节装置的维护** 定期通过引出的测试孔进行测试。备用装置要定期试验、切换,为了缩短检查、修理、维护时间,备品中应包括部分组件。当有远方控制调节功能时,检查范围要包括传输信道。

**直流断路器的维护** 要定期测定动作时间、绝缘电阻和耗气量,以及并联于断路器两端的元件,并参考制造厂的意见,动作上千次后要作解体检查。

**交、直流滤波器的维护** 日常检查与常规的电力电容器、电抗器相同(见并联电容器组运行维护、并联电抗器运行检修)。必要时在定期检查中测定各支路的谐振特性,防止失谐,对有温度补偿功能的滤波支路要验证其补偿性能。

**直流互感器的维护** 包括直流电流互感器和直流电压互感器的维护工作。尽管它们结构、原理上有所差异,但都要有不停电的稳压电源供电,以保证电源的稳定、可靠。其它维护工作与交流互感器的相同。

**直流输电线路的维护** 可分为直流架空线路、直流电缆线路和大地(海水)回流电路的维护三个方面。

**直流架空线路的维护** 在直流电场作用下的线路绝缘子有吸尘作用,比施加交流电场时更容易被污染。运行中要加强巡视和清扫,并注意根据线路所经区域的污秽等级和选用的绝缘子型号,决定巡视和清扫周

期。由于有电晕放电存在,更应注意到靠近导线侧的绝缘子。其它的运行维护工作与交流输电线路的相同。(见输电线路巡视检测)

**直流电缆线路的维护** 直流电缆本体在运行维护中与交流电缆无明显差别(见电缆线路巡视检查)。直流电缆终端瓷套由于有吸尘作用,要特别注意清扫。

**大地(海水)回流电路的维护** 大地(海水)回流电路的设备,包括接地电极和接地极引线。接地极引线是低绝缘的架空(或电缆)线路。维护的重点在于接地电极。日常需记录通过大地(海水)回流电路电流的大小、极性和持续时间,以此决定电极的维护和更换的时间。要注意电极在作阳极运行时的电化腐蚀情况。在直流输电工程运行初期需抽样检查电极附近地区地下(或水中)金属构件的腐蚀情况。了解大地(海水)回流电路运行时对交流输电系统、电信、铁路信号、航海和水生物的影响,以确定有无改善电极设施的必要。

(潘久经)

zhiu shudian xitong zidong zaiqidong

**直流输电系统自动再启动** (automatic re-start of DC transmission system)

在直流架空线路故障时,直流系统自动紧急移相短时停运之后,自动再快速启动,以便及早恢复送电的技术措施。

直流架空线路对地短路多半是非永久性故障。当故障点的电流随系统短时停运下降到零而消失时,该点的绝缘有可能自行恢复,直流系统自动再启动即有可能成功,并可全部或部分恢复送电。因此,当保护装置判断为直流线路故障时,立即将整流器的触发角 $\alpha$ 快速移相到 $110^\circ\sim 150^\circ$ ,使整流器变为逆变器运行。在两端均为逆变运行的情况下,储存在直流系统中的电磁能量将迅速地送回到两端交流系统,直流电流在 $20\sim 40\text{ ms}$ 内降到零。再经过预整定的 $100\sim 400\text{ ms}$ 的时间弧道去游离后,直流输电系统自动再启动。

自动再启动过程为:按一定速度减小整流器的触发角 $\alpha$ ,使其恢复为整流方式,并将直流电压和电流升到整定值,使直流系统恢复到故障前的状态,再启动过程结束。从故障开始到再启动过程结束,一般可在 $150\sim 500\text{ ms}$ 内完成,比交流的自动重合闸时间要短。

如果故障点的绝缘未能及时恢复,一次再启动可能失败。这时,可再次进行直流线路故障处理(紧急移相停运)和第二次再启动。为提高再启动的成功率,在第二次再启动时,可加长整定的去游离时间,减慢电压上升速度或降低直流电压运行。如果第二次再启动仍不成功,则认为故障是永久性的,由保护装置发出停运信号,使直流系统停运。

(赵晓君)

zhihu shudian xianlu

直流输电线路 (DC transmission line)

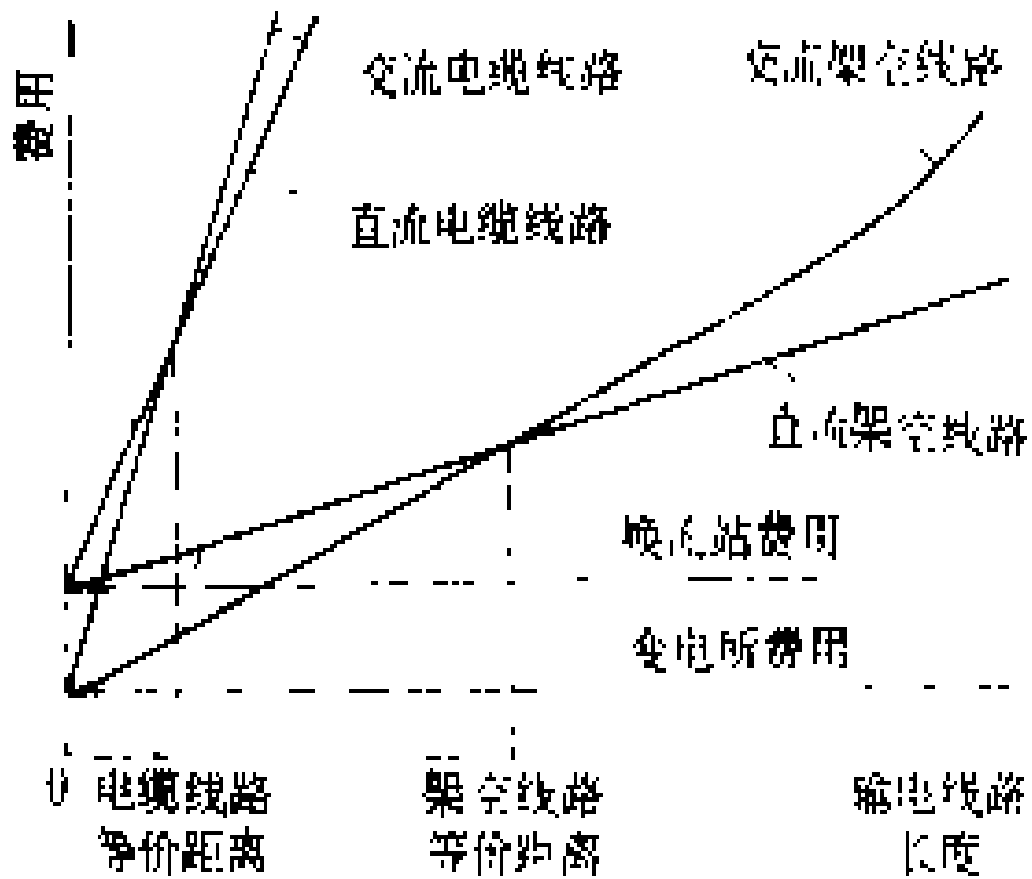
接在换流站之间以直流传输电力的线路。它是直流输电系统的一个重要组成部分。直流输电之所以在经济上具有竞争力，其主要原因就在于直流输电线路的经济指标优于交流输电线路。按基本结构的不同，直流输电线路可分为直流架空线路、直流电缆线路和直流“架空-电缆”混合线路三种类型。

回流电路也可看作为直流输电线路的一个独特的组成部分（见回流方式）。与交流线路不同，直流输电线路可以利用一端接地的低绝缘水平金属导线作为回流电路，简称金属回路；也可以利用大地或海水作为回流电路，简称大地回路。

在直流输电线路中“极”的定义相当于三相交流输电线路中的“相”。但从电力传输的技术要求来看，交流输电线路必须三相才便于运行；而直流输电线路中的“极”（正极或负极）却能独立工作，任何一极加上回流电路就能单独输送电力。

在输送功率和输送距离相同的条件下，直流输电

线路的费用要比交流输电线路的少得多。因此，当输电距离达到某一长度时，直流输电线路比交流输电线路节省的那部分费用将能抵偿直



交、直流输电费用与输电线路长度的关系示意图

流变电所增加的费用，这一输电距离称为交、直流输电的等价距离，如图所示。由于电力电缆线路价格昂贵，而且电缆绝缘在直流下的耐压性能比在交流下的好，所以电缆线路的等价距离要比架空线路的等价距离短得多（见图）。在相同的可比条件下，当输电线路长度大于等价距离时，采用直流输电将比交流输电经济。

(郑德明 赵智大)

zhihu shudian yu jiaohu shudian

直流输电与交流输电 (DC and AC transmissions)

两种最基本的输电和联网方式。它们都具备输送电能和互联电网的主要功能，但又各有不同的技术经济特征。在研究远距离输电和电网互联的基本方案时，首先是对比直流输电与交流输电两种不同方式，进行初选。现代电力系统的发展，仍是以交流输电为主体，当前直流输电还只占据某些关键环节。但

是，直流输电的发展很富有生命力。目前世界上直流输电还没有发展成网。

在研究输电和联网方式时，一般都是根据具体条件作具体分析，扬长避短成为主要原则。从输电特征与联网效益两个方面对直流输电与交流输电的主要技术经济特征进行比较，再经过综合考虑后作出选择。

输电特征 主要是以直流输电工程与交流输电工程本身的技术经济特点作比较。直流输电与交流输电的重要特征对比如表。

直流输电与交流输电重要特征对比

项 目	交流输电	直流输电
电能类型	三相交流，正弦波	正、负单极或双极直流
换流设备与造价	升降压变电所结构简单，设备价格及工程造价低	整流、逆变等换流装置结构复杂，且需滤波装置，设备价格及工程造价昂贵
架空线路工程及其造价	三相导线、杆塔结构较繁，长线路需要分段，需要串联及并联补偿装置，技术复杂，工程造价高	单极或两极导线，杆塔结构简单，不需要线路分段与补偿装置，工程造价低
电缆线路工程及其造价	高压交流电缆长线路的电容电流很大，限制了承载负荷电流，必须中途以并联电抗补偿，海底电缆无法中途补偿	直流电缆以相同的绝缘，用于直流的工作电压比用于交流时要高三倍左右，换言之，相同电压的直流电缆价格比交流的低很多
输送容量	决定于线路本身条件及系统条件，不易控制	决定于线路本身条件，与系统条件无关，且控制方便
故障时输送容量情况	单极故障不能继续供电	双极线路单极故障可以单极输送一半容量
中间引出	可中间引出，中间电源支持	不利于中间引出，多端直流输电正在研究
成网的可能性	已形成大规模交流电力网	尚未成网

等价距离 直流输电工程投资与交流输电工程投资正好相等时的输电距离。超过等价距离，直流输电工程比交流输电工程经济；低于等价距离，则交流输电工程比较经济，见图 1、图 2。



输电工程的总投资由终端设施投资与线路投资构成,即

$$\text{输电工程投资} = \text{终端设施投资} + \text{单位长度线路投资} \times \text{线路长度}$$

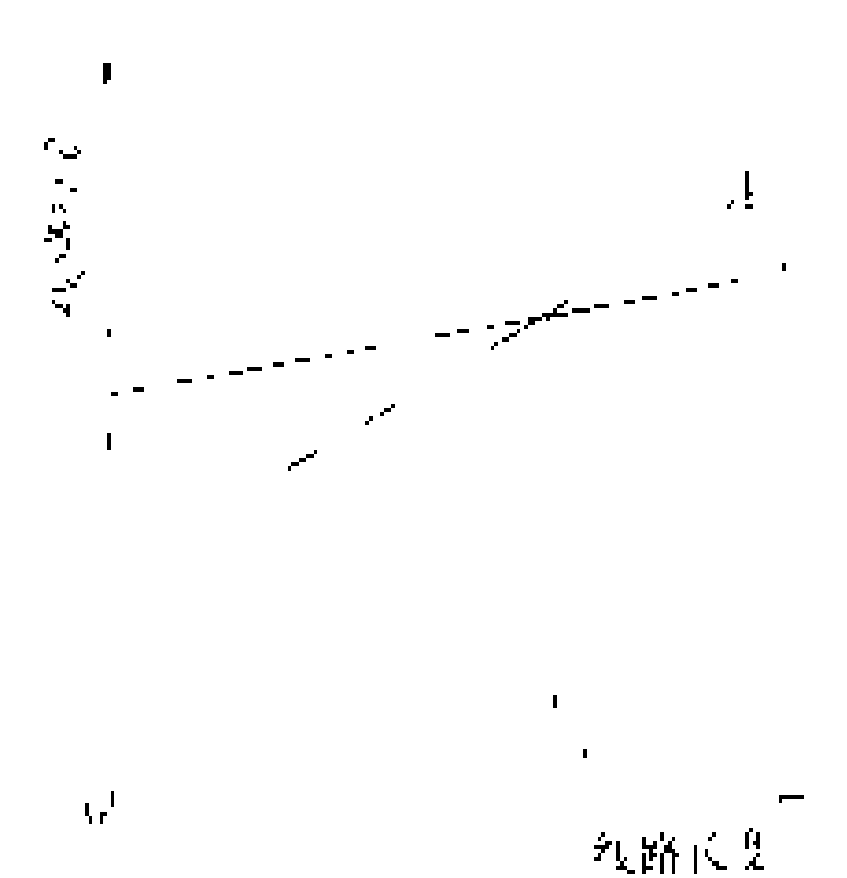


图1 交直流输电线路投资比较  
1—交流线路投资; 2—直流线路投资; 3—临界输送距离

由于输送相同的功率,使用相同的导线截面与相同的绝缘水平,直流输电只需两根导线,而交流输电则需三根导线,所以直流线路比交流线路大约可以节省三分之一的投资,线路越长节约的绝对值越大。然而直流输电的换流站比交流输电的变电所的设备复杂而昂贵。

当线路长度超过等价距离时,直流线路节约的投资,足以抵消换流站所增加的投资,才开始对直流输电有利。

显然,等价距离是随着换流站设备价格的变化而变化的,趋势是直流工程增多,换流站设备价格相对降低。等价距离在不同时期、不同国家也不相同。国际大电网会议提供的统计资料表明,采用架空线路输送540~2160 MW功率,其等价距离约在640~960 km之间,变化范围很大。所以,对采用交流或直流输电工程的经济比较,要按当时当地的具体条件和设备价格进行分析计算,除基建投资外,还应考虑运行费用,主要是输电损耗。

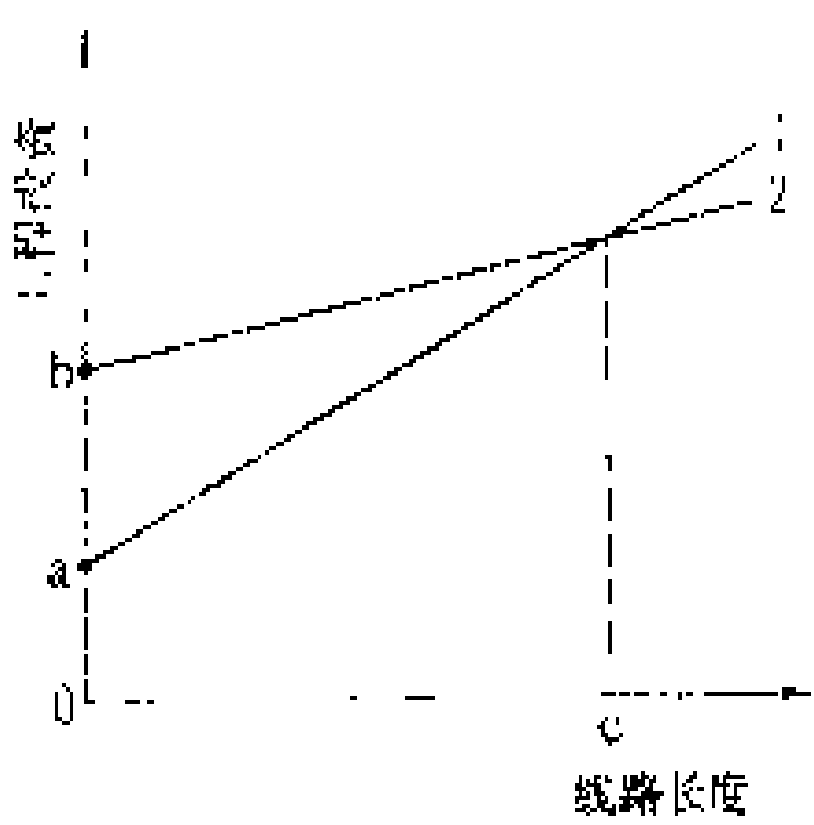


图2 交直流输电线路的等价距离  
1—交流输电线路工程投资;  
2—直流输电线路工程投资;  
a—交流输电终端设施投资;  
b—直流输电终端设施投资;  
c—等价距离

海底电缆单位长度的投资更大,而且交流电缆比直流电缆更贵,故海底电缆输电工程选用直流电缆极为有利,它的等价距离很短,甚至可以不考虑。

直流输电联网功能 直流输电兼有输电和联网双重功能,能以正、反两个方面输送电能,并配置有必要的调压、调功率、保护和控制措施。对于直流输电实现联网功能,还配置可保证正、反方向输送电能的控制系统。

从输电联网的功能作比较,直流输电联网比交流具有许多特点和技术优越性:①可直接互联两个不同频率的电力系统或电源,而不需附加换频装置,例如可将50 Hz与60 Hz的电力系统互联。②可直接互联两

个不同额定电压的交流电力系统,而不需附加变压装置,例如可将330 kV与500 kV的交流电力系统互联。③两端交流系统的频率相同,但运行的控制原理不同,也可以利用直流互联,而无需改造交流控制系统,从而取得联网经济效益。④直流输电可用于两大交流电力系统之间的弱联系,以其快速而灵活的潮流控制(与交流系统的状态无关),克服交流系统之间弱联系上常有的潮流和稳定控制方面的困难。⑤当交流系统的安全稳定性能,不能满足要求而又需要互联时,采用直流输电或直流背靠背互联工程,是最为适当的方案。在这种情况下,直流系统可使一端交流系统的事故干扰不会严重地反映到另一端的交流系统,起到“消震”的作用;同时,直流系统还可利用其快速控制的功能,改善交流系统的安全稳定性能。⑥两个交流系统以交流互联将导致整个系统的阻抗减小,从而增大全系统的短路电流水平,使现有的断路器和与短路电流有关的设备及设施,有可能无法继续使用。这种改造工作非常繁复,耗资也很大。以直流输电互联两个交流系统,则不增加短路水平,不需改造设备和设施,从而为两交流系统的进一步发展创造了宽裕条件。⑦直流输电工程可以分期建设和逐步提高运行参数。可以先建单极运行,后建双极;可以积木式叠加方法升高电压与扩大容量,而无需更动整个昂贵的控制系统。⑧直流输电工程可以用于控制交流环网的潮流,以取得经济效益。⑨直流输电可以连接变频发电厂,例如抽水蓄能电站在抽水蓄能和发电两种不同工况和不同水头下,可以采用不同的转速,按不同频率发电,以取得最佳的效率。

(费翔群 何大愚 徐博文)

zhiliu shudian yuandong tongxin sheshi  
**直流输电远动通信设施** (telecommunications for DC transmission)

用于换流站之间和调度中心与换流站之间传送直流输电系统的测量、控制、调节、保护、监视信号和话音通信的设施。为了传送上述信号,需要配置信号输入、编制、调制、传输(发送至对方接收)、解调、译码、驱动等环节。

由于直流输电远动通信设施对保证系统可靠运行极其重要,所以要求通信设施信号正确、信息可靠、设备可用率高、响应速度快。

- (1) 信号正确。要求任何时刻不发生错误,话音信噪比不小于30 dB。
- (2) 信息可靠。要求信号在任何情况下保证数据传输误码率不得大于 $10^{-5}$ 。
- (3) 设备可用率高。主通道可用率要求不小于99.9%,需考虑采用两套互为备用的系统。
- (4) 响应速度快。数据传送速率不低于1200bit/s,

信号传送速度应满足直流输电控制系统所规定的响应要求,一般传送时间为 30 ms。

已经采用过的信号传送方式包括微波通信、电力线载波通信、特高频无线电通信及有线(含电话线等)通信设施。为了保证传送信息可靠,应以两种不同方式的通信设施互为备用。至于采用的方式由各个实际工程根据具体情况和技术经济比较决定。目前大多数直流输电工程采用微波通信与电力线载波通信互为备用的方式。电力线载波通信投资少,运行可靠,得到广泛地采用。微波通信的优点在于通道数的选择有较大自由度。

直流输电系统通常设有遥信、遥调、遥控和遥测。远距离传送的信号包括模拟量和开关量两种。模拟量典型信号如:直流电流、直流电压、直流功率、换流器触发角、交流系统频率等,它们大都是连续量,既有实测值,也有整定值。模拟量必要时也可通过模数变换,转换成二进制数字量,串行或并行传输。开关量信号有控制调节指令和运行状态显示两方面。典型的传送信号例如:改变运行方式和选定控制调节模式指令,操作指令(包括直流输电系统起停、单极的投入和退出、换流器闭锁与解锁、潮流反转、事故支援、开关操作等),保护连锁指令;运行方式显示,主要模拟量信号的数字显示,开关位置显示,换流器元件故障的显示;以及线路故障定位等。此外,还要担负音频通信的任务。

对模拟量信息和对操作、检测及其显示,每极一般都设一个双路数据传送速率不低于 1200 bit/s 的信道。对故障定位也设一个同样的双路信道。电力线载波通信一般设 6~8 个信道。直流电力线载波通信多数采用极线耦合方式,极线-低绝缘屏蔽地线的耦合方式经论证为优越时才可采用。

见变电所运动装置。

(胡良珍)

zhiliu xianlu diancanshu

**直流线路电参数** (DC line electric parameters) 直流线路的单位长度电阻、自感、互感和电容等物理量。在分析直流线路稳态运行且忽略不计电流中谐波分量时,只需用到电阻参数。在研究直流线路暂态过程和谐波电流时,则需考虑电阻、电感和电容参数,而且需计及不同频率谐波电流作用下导线的集肤效应和地中电流分布对电阻和电感参数的影响。直流线路有架空线路和电缆线路两类,又有单极线路和双极线路之分,共有四种,它们的单位长度等值电路和参数各不相同。

**单极架空线路的参数** 以大地为回流电路的单极架空线路,其单位长度等值电路如图 1 所示。

(1) 单位长度电阻  $R$  包括导线电阻  $R_c$  和大地电阻  $R_g$ , 即

$$R = R_c + R_g \quad (1)$$

若计及导线的集肤效应,  $R_c$  与无量纲变量  $s$  有关,

$$s = \frac{a}{2} \sqrt{\pi f \mu_0 \gamma_c} \quad (2)$$

式中  $a$  为导线的半径, m;  $f$  为电流的频率, Hz;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ , 为真空导磁率, H/m;  $\gamma_c$  为导线的电导率, S/m。

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } s < 1 \text{ 时, } R_c &= R_{c0}(1 + s^4/3) \\ \text{当 } s > 1 \text{ 时, } R_c &= R_{c0} \left( \frac{1}{4} + s + \frac{3}{64s} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中  $R_{c0}$  为导线单位长度的直流电阻。

单位长度大地电阻  $R_g$  可用卡逊 (J. R. Carson) 公式计算,考虑到大地对单极导线大地回路的影响,即

$$R_g = \mu_0 f W_{11}, \quad \Omega/\text{m} \quad (4)$$

式中系数  $W_{11}$  可根据卡逊参数  $r$  和  $\theta$  由卡逊积分表查得

$$r = 2h \sqrt{2\pi f \mu_0 \gamma_g}, \theta = 0 \quad (5)$$

上式中  $h$  为导线离地的平均高度, m;  $\gamma_g$  为大地的电导率, S/m。当  $r \leq 0.5$  时,  $W_{11}$  可用式 (6) 计算,误差不大于 2%。大地对第  $i$  根和第  $k$  根导线回路的互电阻值和互电抗值的影响系数分别记为  $W_{ik}$  和  $V_{ik}$ 。当  $i = 1, k = 1$  时,  $W_{ik}$  为大地对第  $i$  根导线回路电阻值的影响系数, 即

$$W_{ik} = 0.7854 - \left( \frac{\sqrt{2}}{3} r - \frac{r^2}{4} \right) \cos \theta \quad (6)$$

(2) 单位长度电感  $L$  可用卡逊公式计算, 即

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2h}{a} + V_{11} \right), \text{H/m} \quad (7)$$

式中  $V_{11}$  根据式 (5) 的参数由卡逊积分表查得。当  $r \leq 0.5$  时, 可用下式计算, 即  $i = 1, k = 1$  时,

$$V_{ik} = \frac{\sqrt{2}}{3} r \cos \theta - \ln \frac{r}{2} - 0.07722 \quad (8)$$

(3) 单位长度电容

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{a}}, \text{F/m} \quad (9)$$

式中  $\epsilon_0$  为真空的介电常数,  $\epsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi)$  F/m。

对于分裂导线, 式 (7) 和式 (9) 中的  $a$  要用分裂导线的等值半径  $a'$  代替, 有

$$a' = \sqrt[n]{B_n a S^{n-1}}$$

$$B_n = \frac{n}{[2\sin(\pi/n)]^{n-1}}$$

其中  $n$  为分裂数;  $a$  为子导线的半径;  $S$  为分裂导线横

截面图中连接子导线中心所形成正多边形的边长。

双极架空线路的参数 以大地为回流电路的双极架空线路几何尺寸示意图如图 2 所示,可看作两个“导线-地”回路。各个导线-地回路的电阻  $R$  和自感  $L$  见式 (1) 和式 (7); 两个导线-地回路的互(耦合)电阻和互感分别用  $R_{12}$  和  $M_{12}$  表示。单位长度等值电路如图 3 (a) 所示。根据卡逊公式,有

$$R_{12} = \mu_0 f W_{12}, \Omega/\text{m} \quad (10)$$

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{D}{d} + V_{12} \right), \text{H/m} \quad (11)$$

式中  $D = 4h^2 + d^2$ , 为一极导线与另一极导线镜像间的距离;  $W_{12}$  和  $V_{12}$  根据卡逊参数  $r$  ( $r = D \sqrt{2\pi f \mu_0 \gamma_g}$ ) 和  $\theta$  ( $\theta = \arctg \frac{d}{2h}$ ) 可查卡逊积分表得到。 $r \leq 0.5$  时,可用式 (6) 和式 (8) 计算。

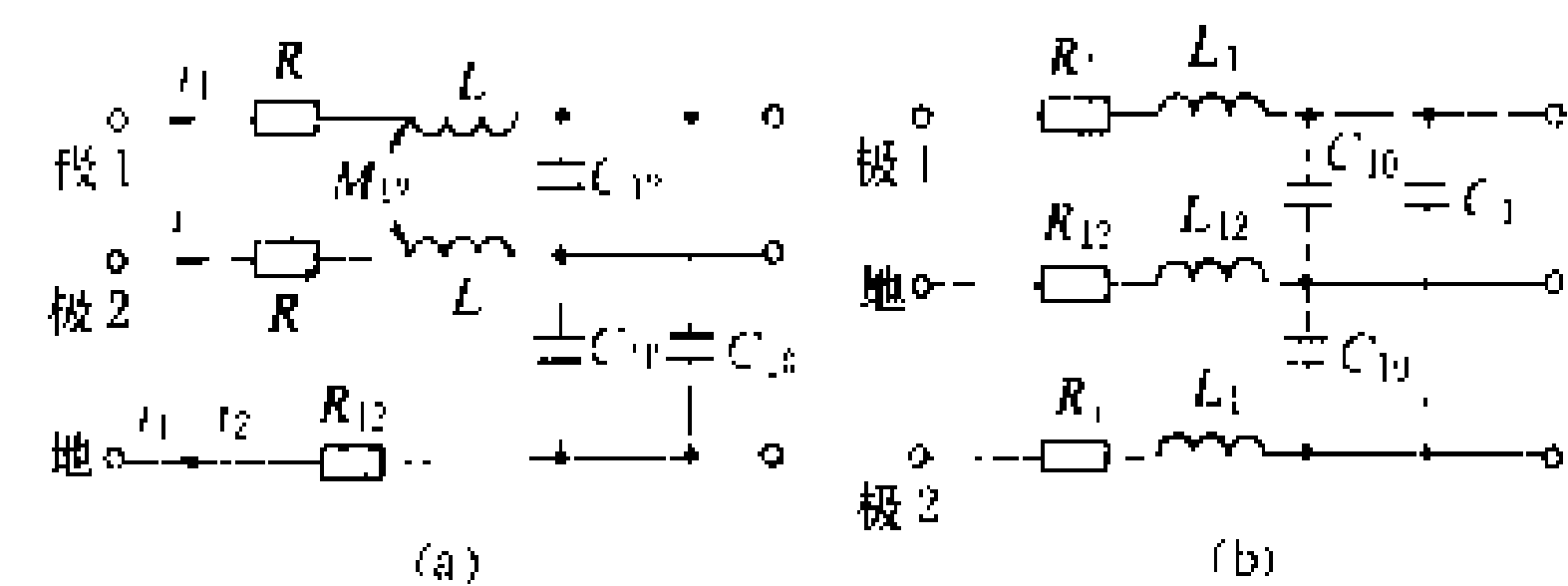


图 3 双极架空线路单位长度等值电路  
(a) 单位长度等值电路; (b) 不含互感的等值电路

各极对地单位长度电容

$$C_{10} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2hD}{ad}}, \text{F/m} \quad (12)$$

两极导线间单位长度电容

$$C_{12} = \frac{\ln \frac{D}{a}}{\ln \frac{2hd}{aD}} C_{10} \quad (13)$$

图 3(a) 可简化为不含互感的等值电路,如图 3(b) 所示,其中  $R_1 = R - R_{12} = R_c + \mu_0 f (W_{11} - W_{12})$ ,  $\Omega/\text{m}$ ;  $L_1 = L - M_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2hd}{aD} + V_{11} - V_{12} \right)$ ,  $\text{H/m}$ ;  $L_{12} = M_{12}$ 。

单极电缆线路的参数

以大地(或海水)为回流电路的单极直流电缆线路,电缆芯线的电流将分别从大地(海水)和电缆铅(铝)包护层返回,包含有“芯线-地”和“芯线-护层”两个回

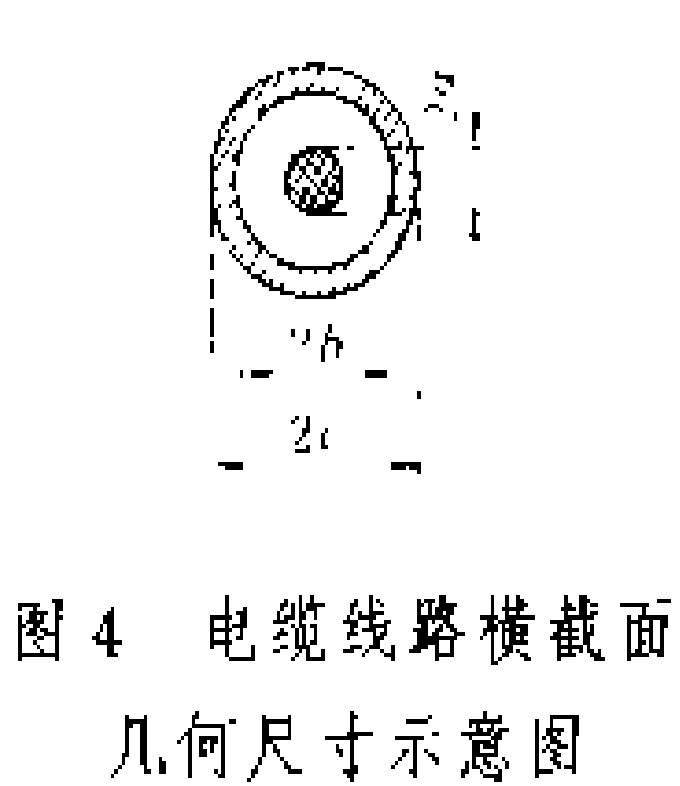


图 4 电缆线路横截面几何尺寸示意图

路。电缆线路截面几何尺寸示意图如图 4 所示。

(1) 芯线-大地回路的电阻和自感可用下列公式计算,即单位长度电阻

$$R_{11} = R_c + R_g \quad (14)$$

其中  $R_c$  为芯线电阻,按式 (3) 计算;  $R_g$  为大地电阻,可按下式计算

$$R_g = \frac{\pi}{4} \mu_0 f, \Omega/\text{m} \quad (15)$$

$$L_{11} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{c}{a} + \frac{1}{4} + \ln \frac{1.12}{c \sqrt{\pi f \mu_0 \gamma_g}} \right], \text{H/m} \quad (16)$$

式中  $a$  为电缆芯线半径,  $\text{m}$  (见图 4),  $c$  和  $b$  为铅包护层的外半径和内半径,  $\text{m}$ 。

(2) 芯线-护层回路的电阻和自感分别为

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= R_c + R_0, \Omega/\text{m} \\ L_{12} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{b}{a} + \frac{1}{4} + \frac{4}{3} \times \frac{c-b}{b} - \frac{2}{15} \times \frac{(c-b)^3}{b^3} \right], \text{H/m} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中  $R_0$  为铅包护层的单位长度电阻。

(3) 芯线-大地与芯线-护层两回路之间的互(耦合)电阻和互感分别为

$$R_{13} = R_c \text{ 和 } M_{13} = L_{12} \quad (18)$$

忽略不计电缆外护层与大地间很小的电位差,当电流芯线通以角频率为  $\omega = 2\pi f$  的正弦波电流时,可得单极电缆线路的单位长度等值阻抗为

$$Z = R + j\omega L \quad (19)$$

单极电缆线路的单位长度等值电路也如图 1 所示。由式 (19) 可得

$$R = R_c + \frac{R_g(R_g + R_0) + (\omega L_0)^2 R_0}{(R_g + R_0)^2 + (\omega L_0)^2} \quad (20)$$

$$L = L_{11} - \frac{R_g(R_g + 2R_0) + (\omega L_0)^2 L_0}{(R_g + R_0)^2 + (\omega L_0)^2} \quad (21)$$

$$\text{其中 } L_0 = L_{11} - L_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{1.12}{c \sqrt{\pi f \mu_0 \gamma_g}} - \frac{3(c-b)}{4b} + \frac{2(c-b)^3}{15b^3} \right], \text{H/m}$$

(4) 电缆单位长度电容

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)}, \text{F/m} \quad (22)$$

式中  $\epsilon$  为电缆绝缘的介电常数,油浸纸绝缘的  $\epsilon = (3.6 \sim 4) \epsilon_0$ 。

双极电缆线路的参数 以大地(海水)为回流电路的双极电缆线路,各极含有“芯线-地”和“芯线-护层”两个回路,两个极的“芯线-地”回路之间存在

互(耦合)电阻和互感。各个极的“芯线-地”回路的电阻  $R_{11}$  和自感  $L_{11}$ ，“芯线-护层”回路的电阻  $R_{12}$  和自感  $L_{12}$ ，两回路间的互电阻  $R_{13}$  和互感  $M_{13}=L_{13}$  分别见式(14)~(18)。两个极“芯线-地”回路之间的互电阻和互感为

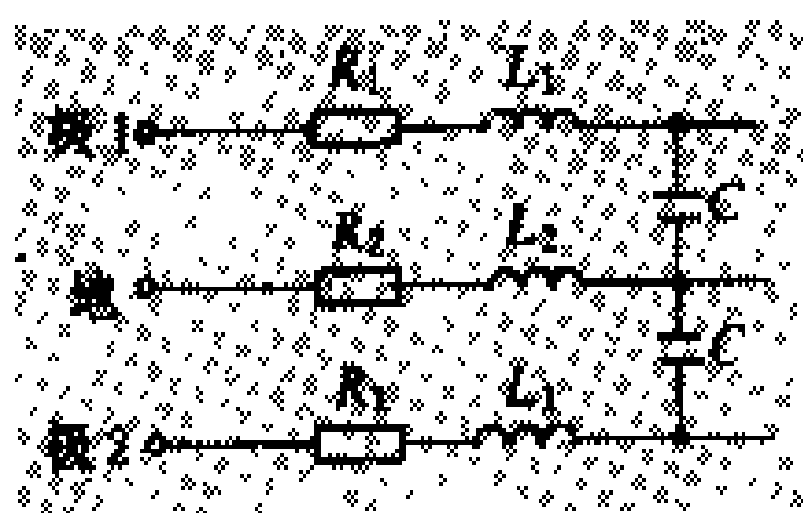


图5 双极电缆线路的单位长度等值电路

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= R_g, \Omega/\text{m} \\ M_{12} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.12}{d \sqrt{\pi f \mu_0 \gamma_g}}, \text{H/m} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

双极电缆线路单位长度等值电路如图5所示，各参数为

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_c + \frac{(\omega L_0)^2}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} R_0, \Omega/\text{m} \\ L_1 &= L_c - \frac{(\omega L_0)^2}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} L_0, \text{H/m} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中

$$\begin{aligned} L_c &= L_{11} - M_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{d}{a} + \frac{1}{4} \right), \text{H/m}; \\ L_0 &= L_{11} - L_{12} - M_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{d}{b} - \frac{3(c-b)}{4b} + \frac{2(c-b)^3}{15b^3} \right], \text{H/m}; \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} R_2 &= \frac{R_g k_1 + \omega^2 M_{12} k_2}{k_1^2 + (\omega k_2)^2} R_0, \Omega/\text{m} \\ L_2 &= \frac{M_{12} k_1 - R_g k_2}{k_1^2 + (\omega k_2)^2} R_0, \text{H/m} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中

$$\begin{aligned} k_1 &= R_0(R_0 + 2R_g) - \omega^2 L_0(L_0 + 2M_{12}); \\ k_2 &= R_0(L_0 + 2M_{12}) + L_0(R_0 + 2R_g). \end{aligned}$$

单位长度电容  $C$  由式(22)决定。

#### 参考书目

[苏] 波谢，直流输电线路及运行方式，华北电力学院直流输电研究室译，北京：水利电力出版社，1979  
(姚茂生 吴国炎)

zhiliu xianlu guzhang

## 直流线路故障 (DC transmission line faults)

直流输电系统中换流站间的直流输电线路处于极导线对地或极导线间短路或主电路导线断路的非正常状态。在直流输电系统中直流线路故障的发生概率相对较高，其后果将导致少送电以至于停止送电。按结构和绝缘方式不同，直流输电线路故障可分为直流电缆线路和直流架空线路两种情况。

**直流电缆线路故障** 海底电缆发生故障的原因主要是船舶抛锚和拖网造成外伤，使电缆外绝缘受损或内绝缘击穿，这种故障一般是持续性的。需要把电缆故障段吊到船上，切去损坏的一段，然后再加以连接。

**直流架空线路故障** 直流架空线路的主电路导体包括：极线、回流电路和接地电极及其引线的导线。回流电路可以是：大地(或海水)回流电路，也可以是低绝缘的金属回流电路。故障方式有短路和断线两种。短路故障可能发生在任何主电路导体之间，其中也包括接地极引线或金属回流电路导体的对地短路。虽然它们对地短路的危害性较其它短路故障轻，但短路故障点附近地面的电位分布对人畜的安全可能有危险，还可能造成导体的电化腐蚀，甚至断线。当主电路导体载有直流电流时，断线处的直流电弧在空中拉开可能发展为导体间的短路故障。

**发生短路故障的原因** 主要是线路绝缘受到过电压、机械损伤或环境污染等造成的。由于污秽导致绝缘子沿面闪络，一般为瞬时性故障，但也不排除可能形成永久性故障。

**故障过程和短路电流特征** 从故障电流的特征而论，短路故障的过程可以分为行波、暂态和稳态三个阶段。

(1)初始行波阶段。如果故障点两侧都可认为是参数均匀分布的线路，沿线路的电场和磁场所储能量的相互转化形成故障电流行波和相应的电压行波。其中电流行波幅值取决于线路波阻抗和故障前瞬间故障点的直流电压值。线路对地故障点弧道电流为两侧流向故障点的行波电流之和，此电流在行波第一次反射或折射之前，不受两端换流站控制系统的控制。经过来回反射、折射之后，故障电流转入暂态阶段。

(2)暂态阶段。直流线路故障电流主要分量有：带有脉动而且量值有变化的直流电流分量(强迫分量)和由直流主电路参数所决定的暂态振荡分量(自由分量)。在此阶段，控制系统中定电流控制开始起到较显著的作用，整流和逆变侧的分别调节使滞后触发角增大，抑制了线路两端流向故障点的电流。如果定电流控制的时间常数过大，暂态故障电流过冲将增大，调节时间也将增长。

(3)最终进入稳态。故障点两侧提供的故障电流稳态值被控制到分别等于各自定电流控制的整定值，两侧流入故障点的电流方向相反，故障点电流为两者之差，即为电流裕额  $\Delta I_d$ 。

在后两个阶段中，故障电流的直流电流分量总带有脉动，而且没有自然过零点，这也是直流线路故障电流的特征。

**故障检测** 可用直流电压变化率、欠电压、纵向

电流差动以及行波检测等方式。行波检测尚可用于测定故障点的位置。

控制和处理对策 消除故障电流和灭弧的主要措施是隔离电源。直流输电中将整流器触发相位移相至逆变状态或采用闭锁整流器触发脉冲，人为地造成两相颠覆，工频分量将加入直流线路，待电流自行过零断开。直流架空线路还普遍采用自动再起动措施，并可以多次再起动。在直流输电中也可以采用降压再起动的方式以提高再起动的成功率。直流电缆线路一般是持续性的故障，不采用再起动，在电弧熄灭后直流系统即转入停运状态。

对高阻接地故障检测缺乏足够的灵敏度，难于与逆变器换相失败故障相区别，常采用纵向电流差动的方法，保护动作延时较长，一般为几秒钟。对接地极引线或接地的金属回线的接地故障，还缺乏高灵敏度的检测手段。由于断开故障电流的直流断路器有待进一步实用化，对于多端高压直流输电系统中迅速隔离线路故障点的有效措施也需进一步研究。

(赵礼生)

zhiliu xianlu zhendang zuni dianlu

直流线路振荡阻尼电路 (damping circuit for DC transmission line oscillation)

用以增强阻尼直流线路及其端部设备构成的直流网络中所发生振荡的附加电路。它的接入使发生振荡的条件发生变化，抑制瞬变过电压。振荡过程中涉及的元件及其参数有：线路电容（特别是直流电缆线路）与阻抗、平波电抗器、直流滤波器和冲击波吸收电容。它们所构成的振荡电路是轻阻尼的，其振荡频率约为 10~60 Hz。在直流系统操作或故障过程中，直流线路受到扰动的激发，会发生振荡现象。如果电流振荡幅值过大，就会使线路电流发生间断，特别在轻负荷时，将出现尖峰状的过电压。因此在直流线路两端设置并联阻尼电路，以消耗振荡电路中的能量，达到抑制振荡的目的。

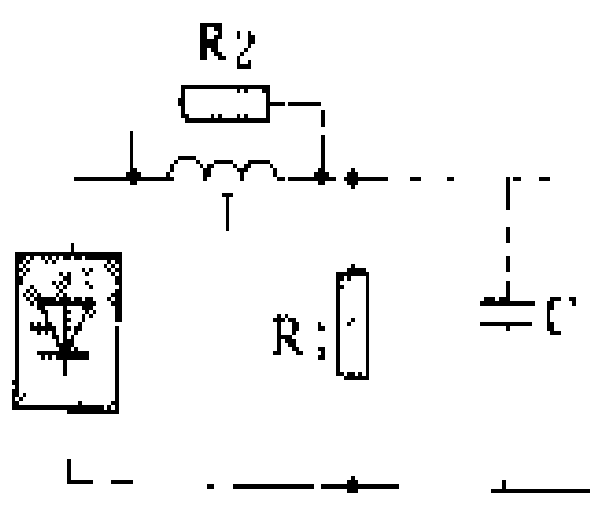


图 1 线路振荡  
阻尼电路

具体构成是将电阻器 R1、R2 分别与线路电容 C 和平波电抗器 L 并联，如图 1 所示。R1 直接并接在直流高压线路上，消耗较大的功率；R2 跨接在平波电抗器两端，也要消耗较大的谐波功率。

这种阻尼电路的运行是很不经济的。为此，可以采用一些改进措施。

(1) 线路端阻尼电路。对于与线路并联的电阻器 R1，可以选用一个隔直电容器与 R1 串联，构成线路终端阻尼电路，如图 2 所示。但隔直电容器需要有较大的

电容量和较高的额定电压，费用昂贵。如果再加装一个电感器，构成一个在振荡频率范围内的谐振电路，以减小该电容器容量。

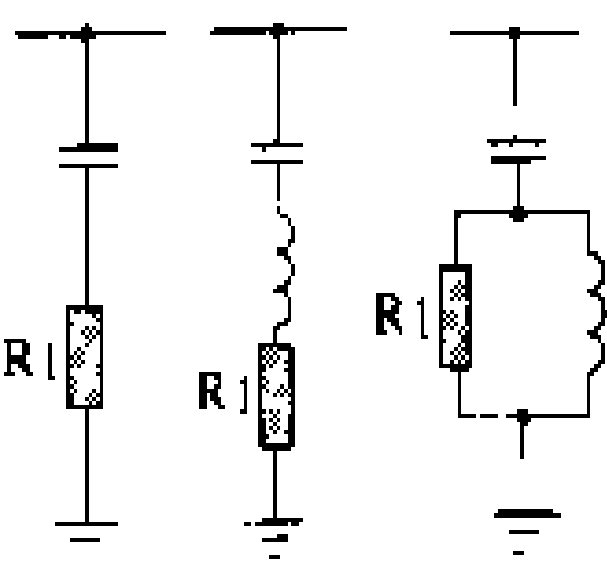


图 2 线路端阻尼电  
路形式

(2) 平波电抗器上的阻尼电路。对于与平波电抗器并联的电阻器 R2，相似地可以选用一个 RLC 电路，如图 3 所示。图中的电容和电感在振荡频率范围内呈现低阻抗，而在高次谐波频率下，呈现高阻抗特性，这样可以减小 R2 上的谐波损耗。

必须指出，抑制线路的振荡，还可以利用换流器调节系统的作用，保持电流恒定，或引入选频反馈的方法等。如果调节系统设计得好，线路振荡的过电压可以限制在允许范围以内。因此，一般地说，在线路上设置阻尼电路是不值得的，只有在为防止直流电缆线路的谐波过电压的情况下，才考虑适宜地采用阻尼电路来降低线路振荡。目前，在直流输电工程中，阻尼电路实际上很少采用。

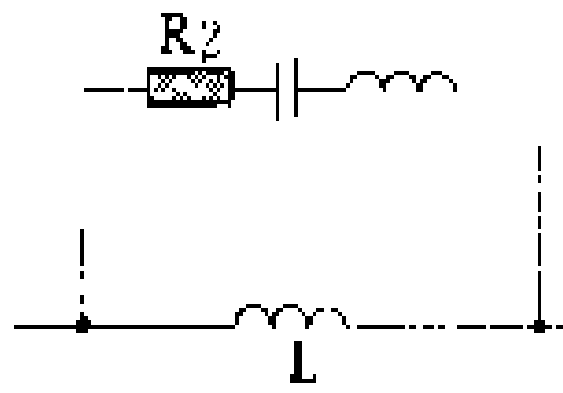


图 3 平波电抗器上的  
阻尼电路

(沈赞坝)

zhiliu yibiao

直流仪表 (direct current instruments)

测量和记录各种直流电学量的表计和仪器。直流仪表主要有直流电流表、直流电压表、直流功率表、万用表和兆欧表等。

直流电流表 采用磁电系测量机构，用以测量直流电路中的电流。测量范围由几十微安到几十毫安，测量大电流时需采用分流器（即并联电阻），以扩大电流表的量程。

分流器用电阻温度系数很小的锰铜制成，并要有足够的散热面积，防止温度过高而造成误差。分流器有内附式和外附式两种，一般在 50 A 以上时为外附式。外附式分流器制成四端结构，即两个电流端钮及两个电压端钮，电流端钮与被测电路串联，电压端钮与测量机构并联，以消除电流接头的接触电阻和引线电阻的误差影响。外附分流器一般标为额定电压和额定电流，额定电压为磁电系仪表的额定电压（即满度电流和仪表内阻的乘积），通常有 75 mV 和 45 mV 两种，额定电流为仪表扩大量程后的电流值。标度盘是按电流值刻度的。

磁电系直流电流表的准确级别有 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5 和 2.5 等，配电屏（柜、箱）上一般选用 1.0



~2.5 级的直流电流表,0.5 级以上的用于精密测量及校表用的标准表。

**直流电压表** 采用小电流量程的磁电系直流电流表,串联以不同数值的附加电阻而构成,用以测量直流电路中的电压。不同数值的附加电阻可构成不同量程的直流电压表,测量范围自几十毫伏到一千伏。

附加电阻用锰铜丝绕制而成,通常作成内附式的,个别的也有采用外附式的。直流电压表的内阻为磁电系测量机构的电阻和附加电阻之和,内阻愈大量程愈大。通常标明直流电压表量程的内阻与相应电压量程的比值,此比值愈大,内阻就愈大,表的灵敏度就愈高。

磁电系直流电压表的准确级别和使用范围与直流电流表的相同。

**直流功率表** 采用电动系测量机构,用以测量直流电路中的功率。其结构原理与交流单相功率表相同。电动系功率表为交、直流两用。(见交流仪表)

**万用表** 具有多种测量功能的仪表。它能测量直流电流、直流电压、交流电流、交流电压、电阻和音频电平,有的万用表还能测量电容、电感并能进行晶体管的简易测试。

万用表由表头、测量线路和转换开关三个基本部分组成。采用高灵敏度磁电系测量机构。直流电流和直流电压测量线路的原理与直流电流表和直流电压表的相同,配以不同的分流器或附加电阻,以得到不同的量程。交流电流和交流电压的测量线路设有整流元件,使磁电系测量机构能测量交流电流和电压,但只适合于波形为正弦的交流量。电阻测量线路由小量程磁电系电流表串以电阻及干电池组成,电流表指针为满度值时相当于被测电阻为零值,标以  $0\ \Omega$ ;电路开路时相当于串接入无穷大值的外接电阻,电流为零,指针停在起点处,标以  $\infty\ \Omega$ ;电流表标度盘按标准电阻值刻度,即可由指针位置读出待测电阻的数值。电感、电容测量线路的原理与电阻测量线路的类似,但要用外接交流电源代替干电池。音频电平的测量线路实质上就是交流电压的测量线路,只是将电压标尺换算为绝对电平标尺。

近年来新出现的数字式万用表,利用数字测量原理,并以数字显示。与模拟式万用表比较,数字式万用表准确度高,还增设测电感、电容等量程,使用更为方便。但数字式万用表不能反映被测量的连续变化情况。

**兆欧表** 测量兆欧以上高值电阻的仪表。主要用于判断绝缘质量的优劣。

兆欧表采用磁电系测量机构,设有两个可动线圈,两者以一定角度交叉固定在一个转轴上,其一通以电流时与永久磁铁的磁场相互作用产生偏转力矩,另一可动线圈通以电流时产生相反方向的力矩,用以代替游丝。指针停留的位置取决于两个线圈中电流的比值,

故称磁电系流比计。在形成兆欧表时,被测高值电阻接入一个可动线圈,另一可动线圈接固定高值电阻,两个支路并联接到一手摇发电机,摇动发动机向两个可动线圈供电,指针发生偏转,由刻度可读出绝缘电阻值。

使用兆欧表测量时,需使发电机在满速下旋转至少一分钟方可读数。手摇发电机满速时的电压有 500、1000、2500、5000 V 等几种,根据被测绝缘电阻的工作电压来选用。

(唐统一)

zhixian dianlan jietou

**直线电缆接头** (straight joint) 用于二根同型号电缆相互连接的电缆接头。用在各级电压的电力电缆线路中。电压在 35 kV 及以下的三芯电缆或分铅型电缆的直线接头,其金属外壳无对地绝缘要求;电压在 35 kV 以上的单芯电缆,其接头两侧的金属外壳要求连通并对地绝缘。在运行中可以将直线电缆接头按需要对地绝缘或接地。直线电缆接头是电缆线路中最先发展的一种电缆接头,虽然已有很多型式,但仍在向安装省时、省料和可靠性高及小型化方向发展。

**导体连接** 电力电缆线路中的不同材料、不同截面积的导体都可用各种连接方法连接。用普通连接管连接时连接管的材料应与导体的材料相同。导体材料不同时,如铜和铝连接,可用铜接管或铜铝过渡接管。非圆形导体在连接前先将股线略予松开后再扎紧成圆形或用圆形压模压成圆芯。导体截面积不相同,常用异形接管连接,其两端内径分别适合不同截面的导体。(见电缆导体连接)

**接头绝缘** 用于油浸纸绝缘电缆的直线接头,以纸带、纸卷或绝缘带绕包后作为主要绝缘,用电缆油或电缆胶灌注在接头中作为辅助绝缘。灌电缆油的优点是 与电缆浸渍剂能够兼容,多数用在高压电缆接头中。灌电缆胶的优点是抗水性能强,如接头有微量渗水缺陷时,尚能维持一定时间,因此多数用在 35 kV 及以下的电缆接头中。

35 kV 及以下的固体挤压聚合电缆接头有的用自粘结橡胶带绕包,有的用热缩型交联聚乙烯管作为绝缘。110 kV 及以下的电缆接头,多数用绕包带或模压成固体绝缘,或用预制接头,或用注射法直接成型。

**接头壳体** 主要是作为电缆金属套在接头处的替代品。接头壳体的内径在 125 mm 及以下时常用挤压成圆筒的铅套管,壳体内径大于 125 mm 时常用紫铜皮焊卷成管状,组成铜套管。铅套管的优点是适用于多种规格的电缆,铜套管的优点是耐受内压力强。充油电缆线路都用铜套管。

**保护匣** 作为电缆铠装在接头处的替代品。常用

在直埋式电缆线路中,作为抗御机械损伤以保护电缆接头用。有的用铸铁浇铸成上下两半盒壳,有的用玻璃钢压制而成,也有的用多块混凝土板组装而成。

(李铃荪)

Zhongguo Dianli Jianshe Yanjiusuo xianlu ganta shiyanzhan

### 中国电力建设研究所线路杆塔实验站

(transmission line tower testing station of Electric Power Construction Research Institute of China)

位于中国北京西南 25 km 处的良乡镇,创建于 1959 年,1978 年又进行了扩建与技术改造,可进行各种类型的输电线路变电所结构的模型试验,也可进行模拟杆塔及其部件的试验。已试验过近百基 500 kV 各种类型的杆塔,最高试验能力可进行 1000 kV 输电线路铁塔的试验。是亚洲最大的线路杆塔试验站之一。

该实验站由动力试验场及静力试验场两大部分组成。动力试验场占地 10500 m<sup>2</sup>,在 3.5 km 的线段上设有七基杆塔,可做断导线、断地线的动态试验及导线、金具等力学试验。静力试验场占地 62500 m<sup>2</sup>,主要可做铁塔及各种架构的力学试验,其主要设施有:①主控制楼及地下室;②万能基础及加荷塔;③卷扬机房及液压加载室;④部件试验室;⑤加工厂;⑥三台吊车(门吊、塔吊及越野汽车吊,最高吊点为 72 m)。

**万能基础** 见线路杆塔试验。该实验站内设有二个大小不同的万能基础,大的建于 1982 年,为 24 m×24 m 大板式的刚性钢筋混凝土矩形基础,基础板厚 2.4 m,基面上设有间隔为 2.7 m,长 24 m 的沟槽,配有四根 4 m 长的活动钢梁,以满足各类被试铁塔根开尺寸的要求。被试铁塔塔脚固定在钢梁的支座上,用放置在沟槽中的长螺栓将钢梁固定在万能基础上。该基础允许:铁塔最大根开为 22 m,塔脚最大上拔力为 2940 kN,铁塔最大倾覆力矩为 129450 kN·m。小万能基础建于 1959 年,为 X 型,在基础中心加设一条 25 m×5 m 的横梁,基础本体为部分预应力钢筋混凝土的工字型梁式结构,基础高 2.4 m,基面上设有间隔为 0.5 m 的预留孔和螺杆,其作用是固定塔脚。该基础允许:铁塔最大根开为 14 m,塔脚最大上拔力为 940 kN,铁塔最大倾覆力矩为 2942 kN·m。

**加荷塔** 试验杆塔时加载用的支撑结构。加荷塔架设在距万能基础 40~60 m 处的两侧,纵向加荷塔高 60 m,宽 40 m,横向加荷塔高 52 m,宽 12 m。纵、横向加荷塔承受总水平拉力均为 2700 kN。塔上设有 3~5 层横梁,梁上设有多个挂点,以满足不同高度的加载要求,挂点允许最大拉力为 294 kN。

**加荷装置** 在纵、横向加荷塔后 40~60 m 处设有卷扬机房和液压加载室。试验荷载是通过接在被试塔上串有拉力传感器的钢丝绳经加荷塔上的滑轮连接到卷扬机或液压装置上而施加的。横向加载室的卷扬机房有 20~80 kN 的卷扬机 8 台,液压室有 8 台 196 kN 和 4 台 118 kN 的液压装置(行程为 3.8 m)。纵向加载室有 8 台 118 kN 和 4 台 196 kN 的液压装置以及 7 台 29~49 kN 的卷扬机。目前纵、横向加载是由协调加载机与液压装置等组成的闭路自动环自动控制。1991 年安装调试的计算机程控加载系统已投入运行。

**主控制室** 设在纵、横向加荷塔之间,距万能基础 80 m 处,是试验的指挥和控制中心。主控制室设有 24 点的协调加载机,所有荷载能同步加载,自动调整,自动闭锁和打印,测控精度误差小于 2%。室内还设有工业电视、对讲机、电话及扩大器等。HP-330 计算机 1991 年投入运行后,整个试验过程中的荷载测控、应变测量、数字处理、安全保护等都将由计算机程序控制。

**部件试验室** 建筑面积为 24 m×12 m,高 9 m,可做模拟塔、电杆杆段、铁塔部件等的力学试验。室内设有 15×5 的钢筋混凝土基座,基面上设有两条通长沟槽和 3 座加荷架。加载装置有各种型号的千斤顶和 4 台 196 kN 的液压加载装置。129 kN 的材料试验机用于塔材试验和各种测试仪器仪表的校验。

**测试技术与设备** 荷载的测试采用专门精制的拉力传感器,铁塔杆件的应变测试采用电阻片、应变仪。为消除长线对测试精度的影响,在大万能基础旁建有一座面积为 30 m<sup>2</sup> 的地下测试室,温度、潮湿等因素对应变的影响都采取有效措施进行校正。杆塔挠度采用经纬仪测量。

(郑仁坪)

Zhongguo Dianli Kexue Yanjiuyuan dagonglu shiyanzhan

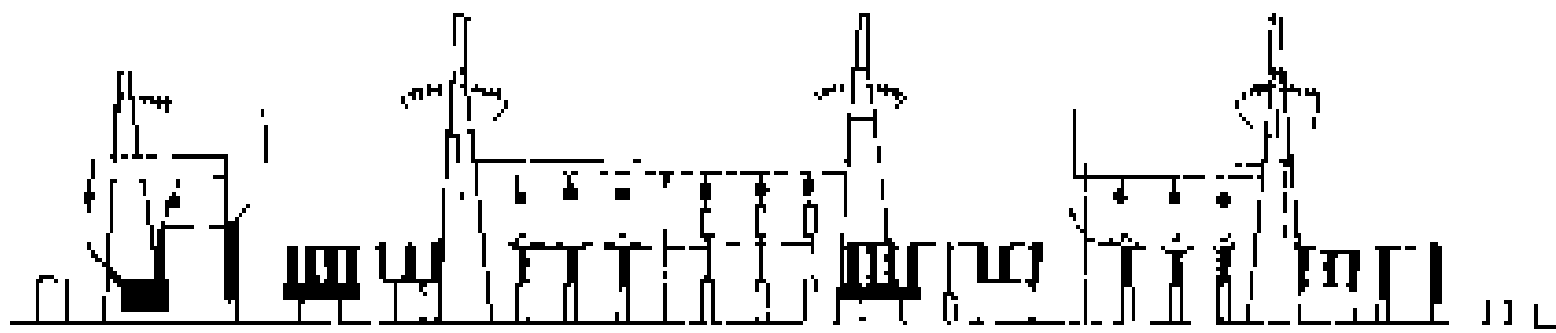
### 中国电力科学研究院大功率实验站 (high power laboratory of EPRI, China)

位于中国北京市区北郊,于 1979 年末投入运行。该实验站的电源有网络电源和振荡回路两种,也可合成运行。网络电源自清河变电所经 1.3 km 220 kV 线路引入,经 3 台 1DJ-60000/220 型短路变压器(每台容量为 60 MV·A,电压为 220/4×11 kV,短路阻抗按 20 MV·A 计为 4%),可得 6.35~76.2 kV 各级电压,经电抗器(6 台 YKDG-25-10 型、6 台 YKDG-20-8 型、3 台 YKDG-5.6-375 型、12 台 TKDG/41.5 型)调节可得几十安至 40 kA 的电流。6~63 kV 级的三相直接试验容量为 500 MV·A,随着北京市 220 kV 电力系统短路容量的增大有可能达到 700~1000 MV·A。振荡

回路由 400 台 MY-30-18 型脉冲电容器 (约 3.2 MJ) 和相应的电抗器组成, 可对 10~35 kV 级真空、SF<sub>6</sub> 和空气断路器作单相直接试验。将振荡回路与网络电源合成, 试验能力为每断口 (55~110 kV)、3000~6000 MV·A。该实验站是中国能源部高压开关质量检验测试中心。

(顾宽鸿)

zhongxing wuwai peidian zhuangzhi  
**中型屋外配电装置** (medium-arrangement of outdoor switchgear) 所有电气设备都安装在屋外地面设备支架或较高基础上的屋外配电装置。电气设备外绝缘体最低部位距地面高度一般不小于 2.5 m。中型屋外配电装置中设备的重心较低, 又无上下重叠布置情况, 所以施工、运行和检修都较方便。但这种布置占地面积较大, 在 110 kV 及以下的配电装置中使用受到限制。为了减少中型屋外配电装置的占地面积, 可以将隔离开关直接布置在母线的下方, 同时可以取消中央门型构架, 见图。这种布置方式较紧凑清晰, 也节省投资。



220 kV 中型屋外配电装置

330~750 kV 屋外配电装置中, 设备高大笨重, 故都采用中型布置。由于其电压很高, 内部过电压在确定配电装置最小安全净距中将起控制作用。此外, 对布置发生作用的因素还有: 静电感应对人体危害的防护措施, 控制电晕和无线电干扰的允许水平的措施, 限制噪声的措施, 以及便于施工安装、运行和检修的措施。中型屋外配电装置的常用尺寸见表。

中型屋外配电装置的常用尺寸 (m)

电压等级 (kV)	35	63	110	220	330	500
导线弧垂	0.7~1.0	0.8~1.1	0.9~1.1	2.0	2.0	3.0~4.2
线间距离	1.3	1.6	2.2	4.0	5.0	6.5~8.0
架构高度	5.5~7.3	7.0~9.0	7.3~10.0	10.0~14.5	13.0~18.0	16.5~27.0
间隔宽度	5.0	6.0	8.0	14.0~15.0	20.0	28.0~30.0

(戈东方)

zhongxingdian diankangqi  
**中性点电抗器** (neutral-point reactor)

在中性点有效接地电力系统中, 接于并联电抗器或电力变压器中性点与地之间的单相电抗器, 也称中性点小电抗。用以限制潜供电流、接地故障电流和过电压。中性点电抗器为额定短时间运行的电气设备, 其结构多数为油浸式带铁芯的绕组或带磁屏蔽的空芯绕组两种。

连接于并联电抗器中性点的电抗器, 主要用于超高压电力系统限制线路接地故障开断后的潜供电流和恢复电压, 同时还可限制非全相运行时线路的工频谐振过电压。并联电抗器中性点接入中性点电抗器后, 相当于在其相间增加了一个电感, 以补偿相间电容。当线路发生单相接地故障时, 如果增加的中性点电抗器的电抗值能满足相间电容全补偿的要求, 则可将潜供电流和恢复电压降到最小值, 以保证单相重合闸的有效使用。

连接于电力变压器中性点的电抗器, 主要用于三相电力系统限制接地故障电流或过电压。对于要求直接接地的变压器, 在其中性点接入中性点电抗器后, 可增加电力系统的零序阻抗, 限制不对称接地故障的短路电流; 对于有效接地系统中性点不接地运行的变压器, 在其中性点接入中性点电抗器后, 可固定变压器中性点与地之间的电位, 避免某些因中性点不接地而引起的过电压。

中国于 20 世纪 60 年代开始研究并联电抗器的中性点电抗器, 作为限制超高压线路潜供电流的措施。1975 年在第一条 330 kV 线路上安装了第一台油浸式中性点电抗器, 并于 80 年代初开始在 500 kV 变压器中性点安装中性点电抗器。

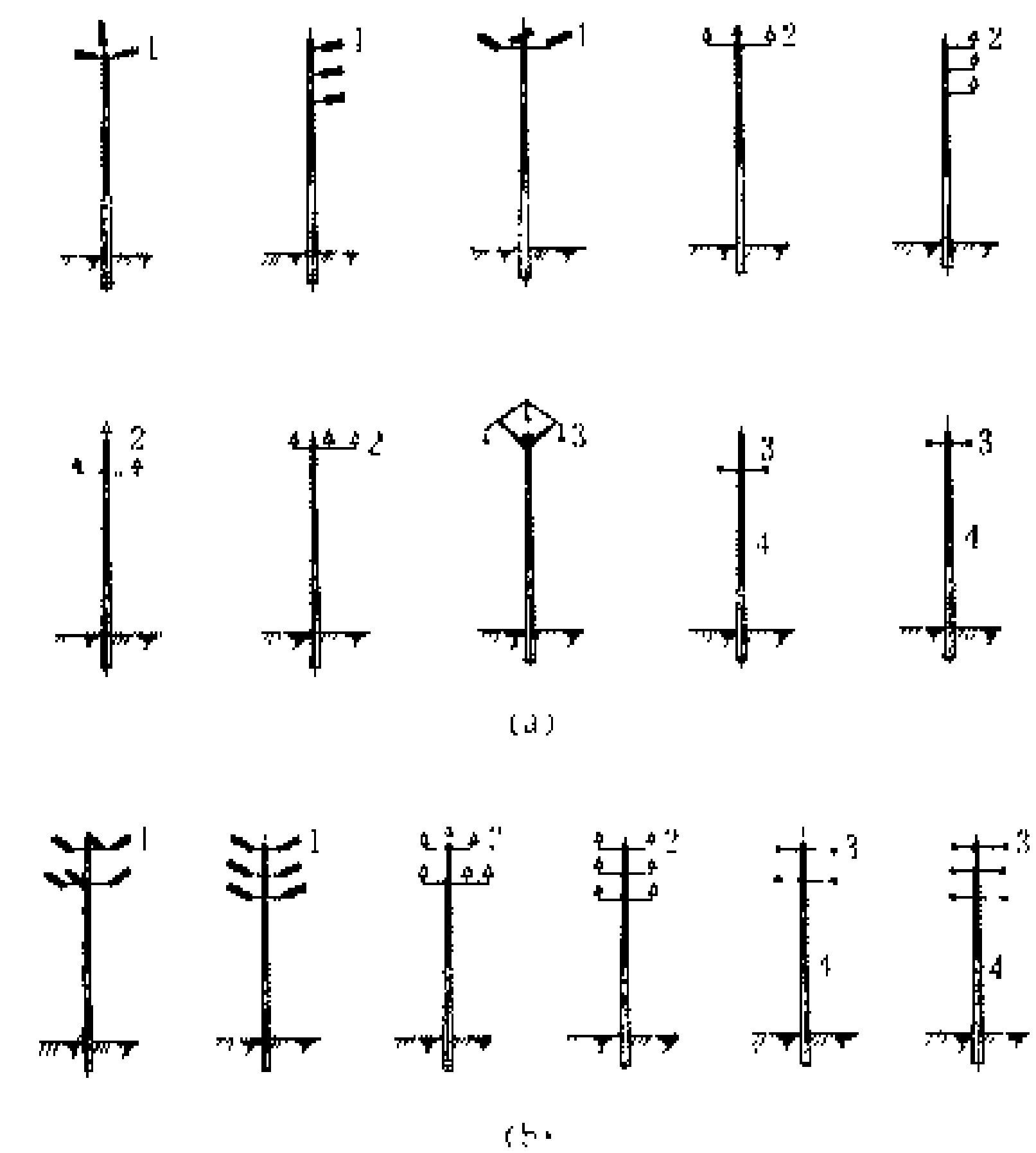
(浦文宗)

zhongya jiakong peidian xianlu  
**中压架空配电线路** (medium-voltage overhead distribution line)

1~20 kV 电压等级的架空配电线路, 也称一次配电线路, 是配电网内电源与用户之间的电能再分配的重要环节。它与配电变电所或配电变压器组成中压配电网, 直接向中压用户供电或通过配电变压器降压后向低压配电网供电。各国使用的中压架空配电线路电压等级

很多, 例如 3 kV、4.16 kV、5 kV、6.3 kV、6.6 kV、6.9 kV、7.2 kV、10 kV、11 kV、12.5 kV、13.8 kV、22 (23) kV 等。中国则以 10 kV 电压等级作为中压架空配电线路的标准额定电压。

**线路组成** 组成中压架空配电线路的主要部件是导线、绝缘子和杆塔。各国使用的导线一般为铜绞线、铝绞线、铝合金绞线或钢芯铝绞线。在城市配电线路上或通过树木茂密地区的配电线路上则使用绝缘导线。使用的绝缘子一般为针式绝缘子、悬式绝缘子和棒式绝缘子。在中国,除了采用针式和悬式绝缘子外,还普遍采用了瓷横担和瓷拉棒绝缘子。各国在中压架空配电线路中使用的杆塔有木杆、钢筋混凝土杆、铁塔或钢杆,中国较多使用钢筋混凝土杆。杆塔间档距一般在几十米至一二百米左右。杆上排列型式较多,如图所示为一些常见的排列型式。



单、双回路中压架空配电线路主要排列型式

(a) 单回路; (b) 双回路

1- 瓷横担; 2- 针式绝缘子; 3- 悬式绝缘子; 4- 转角耐张终端杆

**主要特点** 在公用配电网中,中压架空配电线路从高压配电网的变电所接受电源,送向用电小区,然后与该处的配电变压器相连接,降为低压供给低压用户。一条中压架空配电线路可以在沿线多处支接配电变压器,也可能只在终端进入配电变电所,通过配电变电所母线送出几路中压配电线,同时在母线上再连接一台配电变压器。此外,也有以中压配电线路直接送至中压用户、从母线的另一端再接出中压线路送往远处另一配电变电所,从而形成中压环形供电网(见配电网结构)。中压架空配电线路有三相三线或三相四线供电方式,后者主要在有单相变压器负载时采用。在过电压保护方面,除特殊情况外,一般较少采用避雷线保护。中压架空配电线路上,常安装有自动分段器、分段断路器或隔离开关等,以便及时隔离故障区段或切换供电电

源,提高中压配电网的供电可靠性。中压架空配电线路上还接有保护配电变压器等的跌落式熔断器和避雷器。

**发展趋势** 中压架空配电线路除在开阔地区和人车稀少地区采用裸导线外,不少国家都已经或正在考虑对人口稠密地区(如城市或近郊)的中压架空配电线路采用绝缘导线。成束中压绝缘导线将随着相应的附件和金具的开发和完善得到推广。随着配电自动化的推进,中压架空配电线路上除了将增加故障区间检测指示装置、自动分段器、自动重合器等自动化设备外,不少国家已开始推广采用光纤复合导线或普通导线外加绕光纤,以增加通信通道。

参见彩图插页第 26 页 80 图

(周德新)

zhongya peidianwang

**中压配电网 (medium-voltage distribution network)**

由中压配电线路和配电变电所(配电变压器)组成的向用户提供电能的配电网。中压配电网的功能是从输电网或高压配电网接受电能,向中压用户供电,或向各用电小区负荷中心的配电变电所(配电变压器)供电,再经过变压后向下一级低压配电网提供电源。中压配电网具有供电面广,容量大,配电点多等特点。

**电压等级** 配电网的形成和发展是从低压到中压,最后到高压配电网。中压配电网的电压等级也是随着电网的发展和负荷的增长,从较低电压开始逐步发展到较高的电压等级。目前有些国家(如法国、日本等)已将 20 (22) kV 作为中压配电的电压,一些工业发展较早的国家,也因此常存在两种或两种以上电压等级的中压配电网。在中国,中压配电网采用 10 kV 为标准额定电压,但还有 6.6 kV 级的电压存在,将在城市配电网的改造中限制使用并逐步取消。有些国家也称中压配电电压为一次配电电压,中国过去也曾如此称谓过。(见配电网)

**网络接线要求** 中压配电网负荷点多而分散,网络接线较为复杂。在网络接线方面,各国均采用停电损失最少、对社会影响最小的综合考虑方法,对中压配电网的可靠性规定了不同的要求。例如英国原则上按配电负荷的大小划分供电的安全可靠性等级。负荷大的安全可靠性要求高,配备较多的电源线,配置必要的备用线路,保证部分线路停运后能满足继续供电的需要,以及规定必须恢复供电的时间;负荷小的安全可靠性要求也降低,配备较少(甚至单回)的电源线,停运后不考虑必须的备用电源,也不规定恢复供电的时间。又如日本则按负荷密度的高、低,将供电可靠性标准划分

为 A、B、C 三个区，分别规定最大停电的时限，在配电网发生单一故障时，除故障部分外，其他用户要在此时限内恢复供电，并且要求在设备检修停用时，不能降低供电可靠性。中国的《城市电力网规划设计导则》规定：向市区供电的中压配电网，应能保证当任何一条 10kV 线路的出口断路器计划检修停运时，保持向用户继续供电；事故停运时，通过操作能保持向用户继续供电，不过负荷，不限电。（见配电网接线）

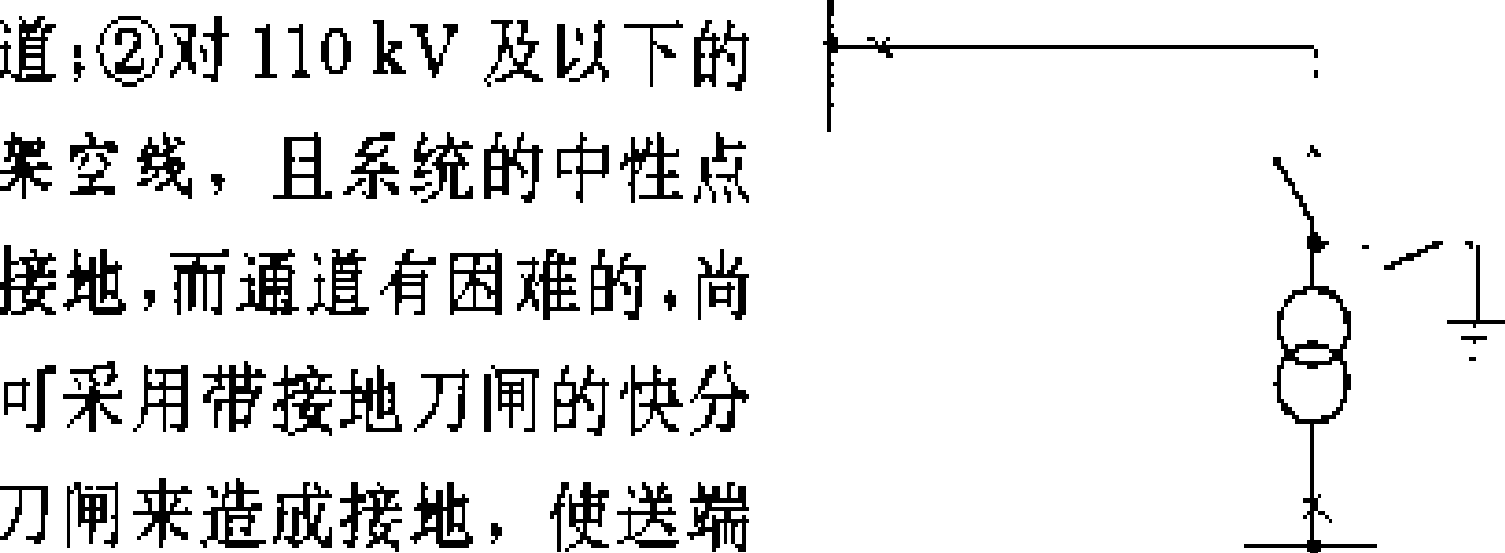
（唐德光）

znongduan bianliansuo  
**终端变电所**（terminal substation）处于网络末端、包括分支线末端的变电所。有时特指采用线路变压器组、不设高压侧母线、不设高压断路器的变电所。终端变电所接线简单，占地少，投资省。

在现阶段网络上，处于终端位置的终端变电所，在发展中有可能成为中转变电所的，通常都是采用带母线的电气主接线，如单母线接线、桥形接线等。

处于终端位置、而将来的发展前景又无中转任务的变电所，其高压进线与主变压器之间可以省去高压侧的母线及断路器，而形成线路变压器组的接线方式。在这种情况下通常是使用负荷开关或使用能切断变压器空载电流的隔离开关，进行变压器的正常运行操作。

变压器故障时，保护则动作前一级的送端断路器以切断电源。保护方法有两类：①配置远方跳闸装置，包括传送跳闸信号的通道；②对 110 kV 及以下的架空线，且系统的中性点接地，而通道有困难的，尚可采用带接地刀闸的快分刀闸来造成接地，使送端



断路器跳开以切断电源。采用第二种保护方式时，送端断路器与终端变电所之间，应无其他变电所，以免扩大停电范围。这种终端变电所，通常是由一组线路变压器组组成，变压器容量

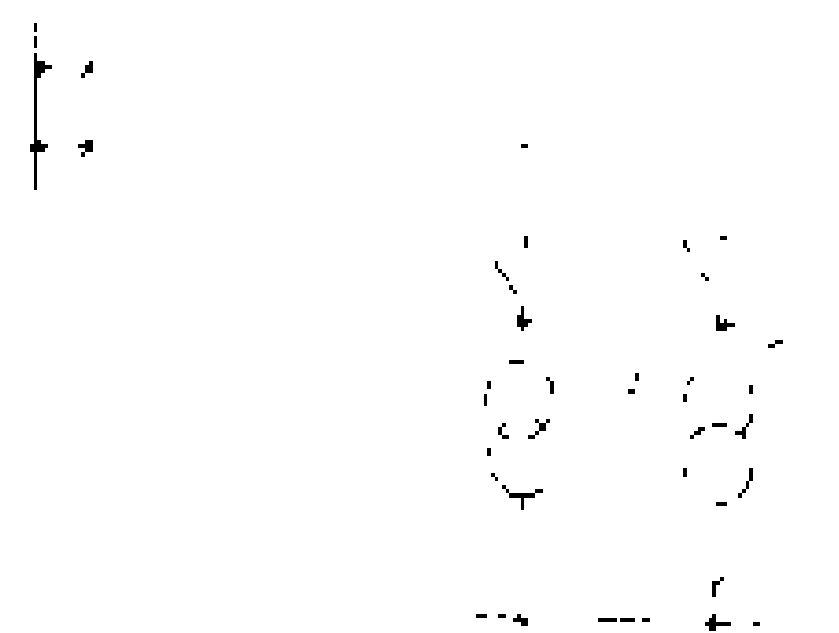


图 2 双组线路变压器组接线的终端变电所

并接入共同母线。这种终端变电所的供电可靠性较高。见图 2。

线路变压器组、无母线连接的终端变电所，无论是单组还是双组，只适用于处于终端位置的、在发展前景中又没有演变为中转变电所可能性的终端变电所。

中转变电所，通常采用带母线的主接线方式。

（徐博文）

Zhoushan zhiliu shudian gongcheng  
**舟山直流输电工程**（Zhoushan HVDC transmission project）中国第一个高压直流

输电工程，是中国的国家重点科技攻关项目。整个工程从科研、设计、制造、施工、调试、直到运行，全部依靠中国自己的力量完成。该工程位于中国浙江省内，由浙江省电力工业局负责建设。该工程将华东电力网的交流电通过浙江省宁波市大碇镇的整流站，向舟山本岛的鳌头浦逆变站送电，配电给舟山各地使用。其地理位置如图 1 所示。

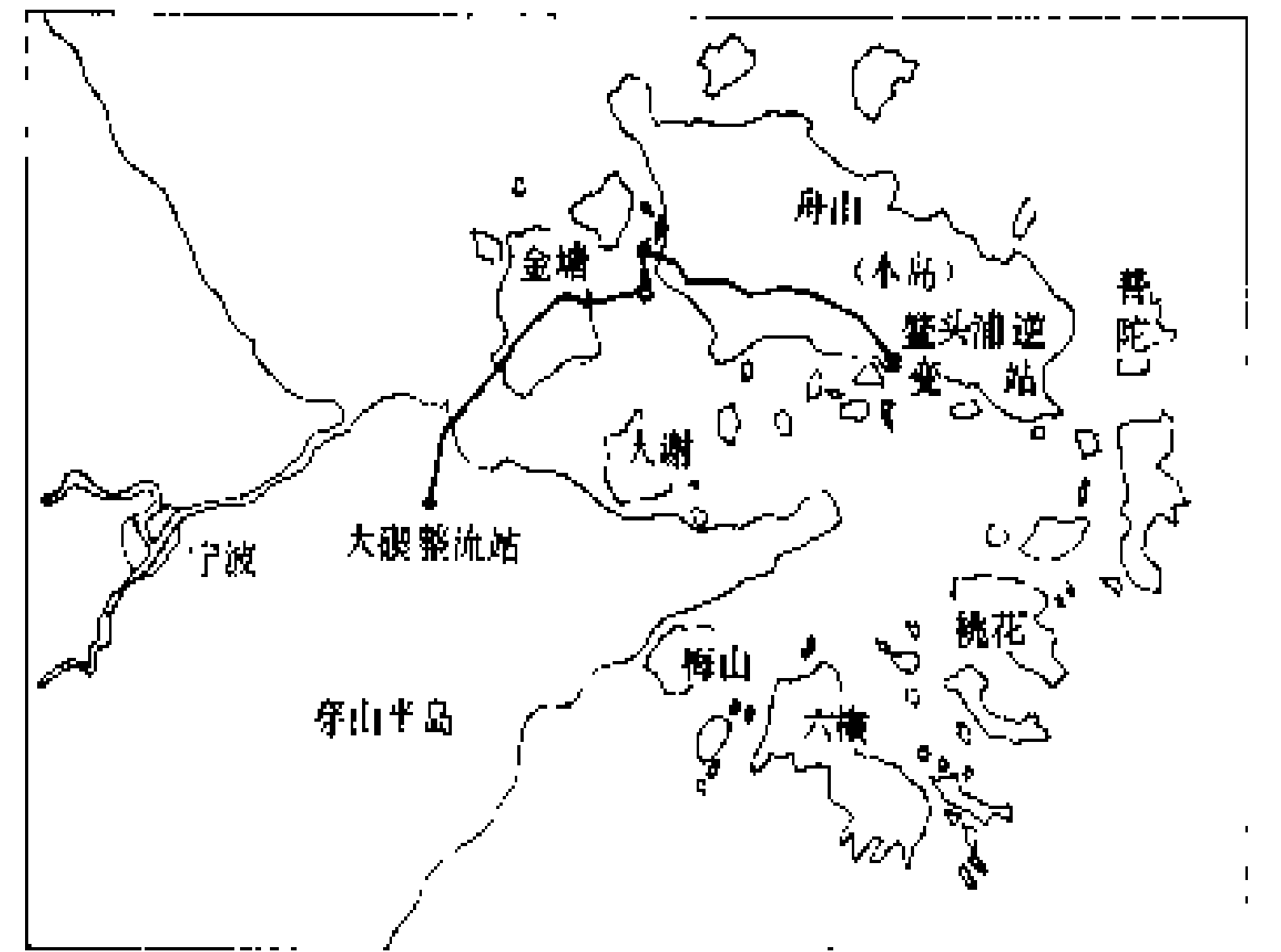


图 1 舟山直流输电工程的地理位置图

该工程的输电距离为 54.1 km，其中架空线分三段，总长 42.1 km；海底电缆分二段，总长 12 km。第一期工程的规模为：直流 -100 kV，500 A，送电 50 MW，单极，6 脉动换流单元。留有扩建二期工程的位置。最终规模为：直流 ±100 kV，500 A，送电 100 MW，双极，12 脉动换流单元。

建设该工程的目的除了实现大陆向舟山地区供电以外，同时通过工程建设，促进中国高压直流输电技术的发展。

工程的电气主接线如图 2 所示，主要设备参数见下表。

工程的主要特点是：①因舟山电力系统容量较小，所以本工程受端为弱系统，是技术上较难的直流输电工程。②线路由多段架空线与海底电缆混合串联组成，回流电路没有利用大地与海水，而采用了金属导体。③交流滤波器接在较低的 10kV 母线上，滤波器所占

场地较小。

舟山直流输电工程主要设备参数

设备名称	额 定 参 数
换流变压器	整流站：ZSFPZ-63MV·A， 115 <sup>+18×1.2%</sup> / <sub>-8×1.2%</sub> /83/10kV 逆变站：ZSFP-63MV·A， 38.5±2×2.5%/81/10kV
晶闸管阀	100kV，500A，水冷，空气绝缘，光 电触发，双重阀结构
平波电抗器	100kV，500A，1.27H
交流滤波器	整流站：2×5、2×7、11、13次、高 通，基波容量 24.5Mvar 逆变站：2×5、2×7、11、13次、高 通，基波容量 23.5Mvar
调相机	TT-30-6-11，30Mvar，1000r/min， 11kV
海底直流电缆	100kV，铜芯 1×300mm <sup>2</sup> ，油浸纸绝 缘，φ6mm 挤塑钢丝铠装
数控装置	ZSK-1Z，ZSK-1N

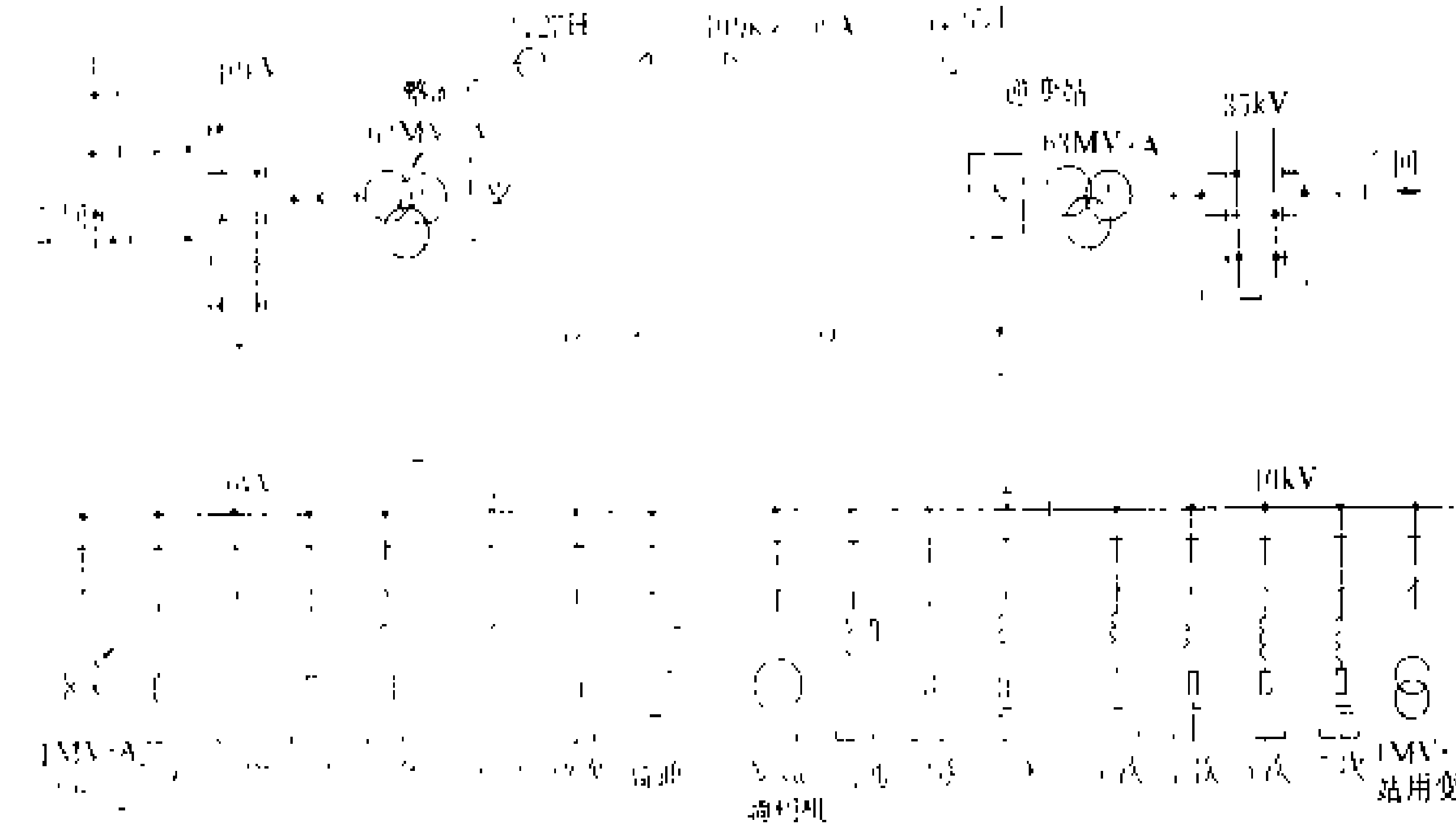


图 2 舟山直流输电工程电气主接线图

本工程于 20 世纪 70 年代后期开始进行调查研究与可行性分析。1980 年底由中国国家计委和国家科委正式批准建设。1981 年国家科委与浙江省电力工业局、西安电力机械制造公司（简称西电公司）签订了科研总合同。1982 年签订了新产品研制协议与供货合同，由西安电力机械制造公司、北京重型机械厂、红旗电缆厂和上海继电器厂承制。1984 年开始土建，1986 年底完成设备安装，1987 年进行调试，于同年 12 月投入试运行，1989 年 9 月 1 日通过了国家鉴定，并正式投入运行。

参见彩图插页第 40 页 122 图。

（郑德明）

zhubianyaqi xuanze

主变压器选择 (selection of main transformer)

主变压器是指变电所中用以接受和分配电能的主要电力变压器。选择主变压器的主要内容包括：①台数与相数选择；②容量选择；③变比与抽头选择；④绕组数选择；⑤调压方式选择；⑥阻抗选择；⑦冷却方式选择；⑧中性点接地方式选择；⑨全星形自耦变压器选择。有些场合还要有铁芯型式选择。很多国家都采用标准化设备。上述内容需根据电力负荷和潮流变化、电力网中短路电流、稳定性、继电保护、调相调压、设备制造条件以及运输等因素进行综合考虑。

台数与相数选择 为避免变压器检修或故障时造成变电所全部停电，变电所中通常装设两台主变压器。但负荷中心的变电所或大型用户变电所，有时选用 3～4 台主变压器。220～330 kV 变压器如不受运输条件限制，通常都采用三相式变压器。对于 500 kV 主变压器选用三相式还是单相式，运输条件是主要决定因素。在中国，由于铁路运输条件的限制，工程中绝大多数 500 kV 变压器都采用了单相式。对于单相式变压器

组，一般不设备用相，但建设初期只有一组变压器时，有时提前安装第二组变压器中的一相，作为备用相使用。

容量选择 主变压器容量按变电所建成后 5～10 年的电力负荷发展规划来选择。凡装有两台及以上主变压器的变电所，当其中一台主变压器停止运行后，其余主变压器的容量能够承担规定的转移负荷。通常要综合考虑供电可靠性要求、变压器的过载能力、变压器台数和

和电力网可能转移负荷的能力等因素。一般估算其余变压器需能保证 70% 电力负荷的供电，在考虑变压器过负荷能力的允许时间内，还能保证对一级和二级负荷的用户供电。

变比与抽头选择 主变压器的变比与抽头需根据设计要求和电力网运行条件选择。

绕组选择 主变压器绕组有双绕组和三绕组两种，选择双绕组变压器还是三绕组变压器取决于各绕组中通过功率的大小和有无无功补偿设备。在具有两种电压等级的变电所中通常采用双绕组变压器，在具

有三种电压等级的变电所中,且各侧绕组的功率均达到该变压器容量的15%以上时,需采用三绕组变压器。当低压侧没有负荷但需装设无功补偿设备时,也采用三绕组变压器,以节省投资和运行费用。

与同容量、同电压等级的普通变压器相比,自耦变压器具有材料省、损耗小、重量轻、尺寸小、易于制造更大容量和能改善电力网稳定性等优点。但自耦变压器也存在一些问题:①由于自耦变压器阻抗小,其中性点必须直接接地或经小电抗接地,增大了电力网中的短路电流,提高了对中压侧断路器开断能力的要求。同时,单相接地故障时还增大了对通信线路的干扰,而且由于高、中压两个接地系统串接在一起,使零序电流保护整定计算复杂化。②如在中性点处进行自耦变压器调压,则当升高中压侧电压时便会降低低压侧电压,限制了电力网的调压要求。③当自耦变压器低压绕组上接有无功补偿设备时,在有些运行方式下,无功功率潮流将影响变压器的有功功率出力,因此需根据无功功率潮流校核自耦变压器公共绕组容量能否满足要求。

**调压方式选择** 变压器调压方式的选择主要是根据电力系统的需要确定。调压方式有两种:①在不带电情况下改变固定分接头,调压范围通常在±5%以内;②带负荷电流调压的有载调压,调压范围可达30%。如电力潮流变化大,使得变电所母线电压波动范围超过电压质量要求,而变压器的固定分接头不能满足要求时,首先考虑增加无功补偿设备来满足电压质量要求。只有当增加无功补偿设备没有效果或不经济时,才选用有载调压变压器。在500kV及以上的电力网中很少采用有载调压变压器,是因为:①调压装置质量不易得到保证,容易出现渗油、漏油、接触不良、绝缘击穿、机构失灵等问题;②电气寿命较低,检修较频繁;③需要有特制的价格昂贵的切换装置,且与变压器容量关系不大。因此,容量较小的有载调压变压器在经济上是不太合算的。

**阻抗选择** 变压器阻抗较小时,对电力网运行稳定和电压质量均有利,但短路电流将增大,并使电气设备选择更加困难。此外,阻抗选择还要考虑到变压器并联运行的条件。因此,变压器阻抗选择是从电力网稳定、潮流方向、无功功率分配、继电保护、短路电流、调压方式和并联运行等方面进行综合分析的结果。

**冷却方式选择** 主变压器的冷却方式有:①油浸自冷却;②油浸风冷却;③强迫油循环风冷却;④强迫油循环水冷却;⑤强迫油导向循环风冷却;⑥强迫油导向循环水冷却。变压器容量较小时通常采用油浸自冷却方式,大容量变压器则通常采用强迫油循环风冷却方式。近年来,在大容量变压器中开始采用强迫油导向

循环风冷却或水冷却方式,它是用潜油泵将冷油送入变压器的线圈之间、线饼之间和铁芯的油道中,这种方式的冷却效率很高。

**中性点接地方式选择** 变压器中性点接地方式分为:①中性点对地绝缘;②中性点经消弧线圈或高阻抗接地;③中性点直接接地或经小电抗接地。在中国,35kV和63kV变压器中性点为对地绝缘、经消弧线圈或高阻抗接地;110kV及以上电力网为直接接地系统,但在一个变电所内的部分变压器的中性点根据继电保护、通信干扰以及减少单相短路电流的要求,可以不接地或经小电抗接地;500kV变压器高压侧的中性点需全部直接接地或经小电抗接地,苏联、日本、美国、加拿大和巴西等国许多500kV电力网都是按这种接地方式运行。

**全星形自耦变压器选择** 为了能和原有35kV电力网并列运行,中国自1967年开始不得不采用全星形自耦变压器,目前电压比多为220/110/35kV、330/220/35kV、330/110/35kV数种。全星形自耦变压器的零序阻抗大,有利于限制单相短路电流,除便于与35kV电力网并列运行外,还便于接入消弧线圈。但它存在以下问题:①它的零序阻抗是非线性的,使继电保护计算整定值与实际值相差较大,降低了继电保护整定的准确性;②降低了反映单相接地故障的差动保护的灵敏度;③三次谐波电流没有通路,使正弦电压波形发生畸变。对采用全星形自耦变压器问题,多年来存在不同的看法和主张。由于它有上述一些缺点,主张在电力网规划的网络结构设计中力求避免出现全星形自耦变压器。按照网络设计的原则,每当出现更高一级电压的网络并使之加强后,应将其低一级电压的网络开环运行,以免产生电磁环网和不经济的潮流分布,并减少短路电流。按此原则处理,本可以不出现35kV并列运行的情况,从而可以不必采用全星形自耦变压器。

#### 参考书目

杨天民,施传立,谭显第.电力自耦变压器及其应用.北京:水利电力出版社,1987

(叶景星)

zhufangdian

**主放电** (main discharge) 见雷云放电过程。

zibaohediankangaxingjingzhibuchangzhuangzhi

**自饱和电抗器型静止补偿装置** (saturated reactor, SR) 利用自饱和电抗器自身的伏安特性,并经适当的电容器校正,自动调节其无功补偿功率

的静止补偿装置。其主要优点是无需调节器，结构简单、耐用，运行可靠，反应快，动态响应时间较短（约为 10~20 ms），无功出力能连续平滑地正负调节，运行维护工作简便，短时过载能力大（可达 3~5 倍），能抑制电压闪变，产生高次谐波少。缺点是不能附加其他控制信号，电压下降时其无功出力要按电压的平方成比例下降，不能分相快速调节，噪音大（约为 100 dB），能耗较大（约为额定容量的 1.5% 以上），一般需加装有载调压变压器，投资较大。

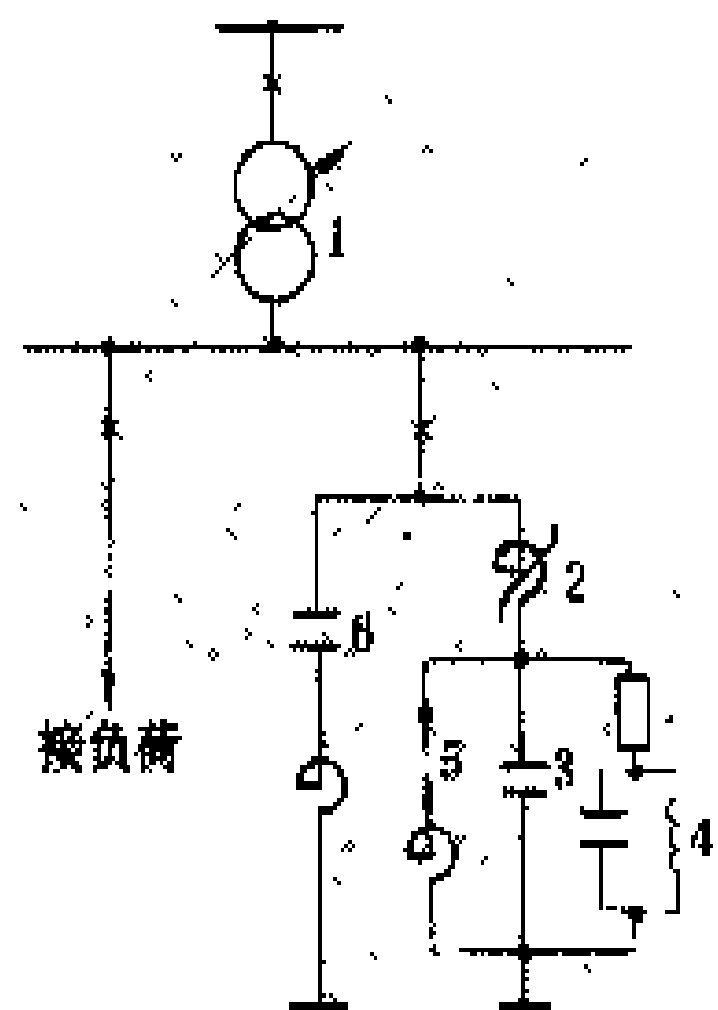


图1 自饱和电抗器型静止补偿装置原理接线

1—有载调压变压器；2—自饱和电抗器；3—斜率校正电容器；4—振荡阻尼器；5—过电压保护器；6—滤波器

**结构原理** 自饱和电抗器型静止补偿装置主要由有载调压变压器、自饱和电抗器、斜率校正电容器、振荡阻尼器、过电压保护器和滤波器等组成，其原理接线和伏安特性分别如图1和图2所示。在图2中，当电网电压变化时，曲线6将上下平移，而有载调压变压器又可使曲线3和5上下平移，以使饱和电抗器在电网电压缓慢变动时能始终工作在规定范围内，避免长期过载或欠载过多。

2—斜率校正电容器伏安特性；串联斜率校正电容器是为了补偿饱和电抗器的斜率电抗，校正其伏安特性的斜率，使曲线1变为曲线3。并联振荡阻尼器和过电压保护器是为了保护斜率校正电容器免遭危险的次谐波振荡和过电压的危害。滤波器是为了吸收母线负荷和电抗器本身产生的高次谐波，并兼作无功电源。图2中的OC是装置的额定电压，当负荷或电网电压发生变化时，饱和电抗器通过不断改变其吸收的无功功率，来使它与滤波器、负荷和电网之间的无功供需处于动态平衡，使母线电压稳定在额定电压下运行。

自饱和电抗器通常采用特殊的内部接线方式来抑制其自身因铁芯饱和而产生的谐波，例如采用三—三柱或二—三柱电抗器结构，可分别消除17次以下或11次以下的谐波。

**用途** 主要用于：①用户负荷补偿，以提高功率因数及电压质量，抑制电压闪变；②输电网补偿，实现调相调压，抑制工频过电压，提高电网的静态稳定、暂态稳定水平和线路的输送能力；③超高压直流输电系统，以补偿换流站所需的无功功率，稳定交流母线的电压。

**发展简况** 自饱和电抗器型静止补偿装置是在1964年由英国GEC公司研制成功的，第一台用在埃塞俄比亚的一台电弧炉上。后来，自饱和电抗器型静止补偿装置又应用于电力系统。由于它过载能力强、反应速度快、结构简单、耐用等突出优点，所以发展迅速，应用较多，目前单台最大容量已达170 Mvar。中国能源部电力科学研究院等单位在1987年为西南铝加工厂冷轧机研制成一套容量为12.7 Mavr的自饱和电抗器型静止补偿装置。

#### 参考书目

Miller T J E. Reactive Power Control in Electric Systems. New York: John Wiley & Sons, 1982

（何丰仁 马廷绪）

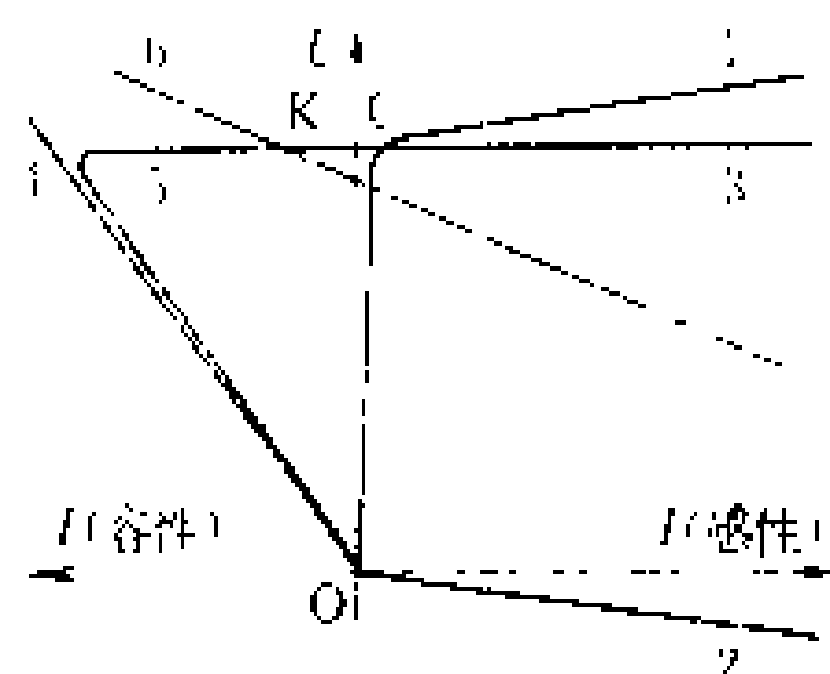


图2 自饱和电抗器型静止补偿装置伏安特性

1—自饱和电抗器伏安特性；2—斜率校正电容器伏安特性；3—自饱和电抗器回路伏安特性；4—滤波器伏安特性；5—补偿装置综合伏安特性；6—电网的等值伏安特性

zidong chongheqi

#### 自动重合器 (automatic circuit recloser)

一种能够自我控制的开关设备，全称为自动线路重合器。其功能为：开断短路电流后自动重合，重合不成功后再次开断、重合，连续重合一定次数（最多可为三次）不成功后即自动闭锁，不再重合并掉牌显示。自动重合器闭锁掉牌后，必须手动将其关合。

**用途** 自动重合器可装在电杆上、构架上或地面基础上。最适宜于装在负荷沿线分布的10~35 kV架空配电线路的较长下线或较大分支上，起分段保护和隔离作用。借助于重合器的作用，当线路发生瞬时性故障时，可不影响用户用电，发生永久性故障时，可限制停电范围。也可装在变电所内，作为10~35 kV出线的主保护开关设备。自动重合器通常配有接地故障保护和遥控、遥测附件，有助于提高配电网运行的自动化水平。

**工作原理** 自动重合器有快、慢两种安秒特性曲线可供选择，一般快速特性曲线只有一条，慢速特性曲线可以有 multiple 条。第一次开断按快速安秒特性曲线整定，以后各次开断则根据保护配合需要选择不同的安秒特性曲线，称之为双时性。自动开断后到下次重合的时间间隔称为重合间隔，可在1~60 s的范围内调定。每一操作程序可选择1~4次开断。在选定的操作程序完成以前自动重合成功时，其控制系统即自动复位。这样，当线路再次发生故障时，将重新按完整的操作程序动作。因此，自动重合器可保证90%以上的架空线路瞬





时性故障不造成停电,并易于与其它重合器、分段器、熔断器进行保护配合,以缩小故障停电范围,提高供电可用率。

选用自动重合器时要注意:①重合器的额定电压应等于或大于安装地点的系统最高运行电压;②重合器的额定电流应大于安装地点的最大负荷电流;③重合器的额定短路开断电流应大于安装地点的最大故障电流;④重合器的最小分闸电流应小于保护范围内的最小故障电流;⑤重合器的操作程序和安秒特性的选择,应保证在上级保护进入闭锁之前,下级保护首先动作,并将永久性故障的停电范围限制在最小范围以内。

**主要类型和特点** 自动重合器分单相、三相两种,一般采用三相重合器。额定电压一般为 $10\sim 35\text{ kV}$ ,最高为 $69\text{ kV}$ 。额定短路开断电流一般为 $6\sim 13.1\text{ kA}$ ,最大为 $16\text{ kA}$ 。控制方式有液压式、电子式两种。灭弧介质有绝缘油、真空、六氟化硫三种。绝大多数自动重合器为电磁机构合闸,弹簧储能分闸。合闸线圈通过两个辅助接点并接在安装地点被保护线路的运行电压上。正常时,合闸线圈不带电;接到合闸指令后,辅助接点闭合,合闸线圈与线路运行电压接通,由线圈铁芯操动合闸机构。合闸过程中给分闸弹簧储能,合闸完毕后,辅助接点自动断开。液压控制重合器的分闸线圈串联在主回路中,线路过流时由分闸线圈直接释放分闸弹簧,操动分闸机构。电子控制重合器的分闸线圈独立于主回路,线路过流时,由控制电路导通直流分闸回路,使分闸线圈带电,释放分闸弹簧。

自动重合器的检修周期依运行情况确定,一般油浸重合器为3年,六氟化硫重合器为10年。

**展望** 自动重合器自20世纪30年代问世以来,在传统的用油或空气作绝缘的杆上断路器上加装自动控制装置,价格昂贵,因此很难推广。近年来,由于真空和六氟化硫断路器的出现,操作机构轻便,加以电子技术的发展,使配套的电子保护和控制继电器的价格趋向于可以接受,其自动控制的功能日渐完备,能适应不同的电网接线和要求,运行效果良好。更由于用户对供电可用率的要求日益增高,自动重合器应用也日趋普遍。中国近年亦已开始使用。

#### 参考书目

McGraw-Edison Co. Power Systems Division  
Publication. Pittsburgh, 1978

NEI Reyrolle. Distribution Switchgear Publication.  
Newcastle, 1987

(纪瑞明)

zidong fenduanqi

**自动分段器** (automatic line sectionalizer)

一种装在配电线路上不能开断短路电流但可关合短路电流,同时也能手动开断或关合负荷电流的开关设备,全称为自动线路分段器。通常是与具有开断和重合短路电流功能的上级开关设备配合使用,起线路隔离、分段的作用。适用于线路长、分支多的架空配电线路。

**工作原理** 自动分段器配有控制、信号机构和操动机构,能实现按功能设计要求的分、合闸和向配电网的控制调度中心传送分合信号。例如,常用的自动分段器的负荷侧线路发生短路故障时,它能记忆上级开关设备开断短路电流的次数,并在达到整定的计数( $1\sim 3$ 次)后,在上级开关设备开断短路后的 $0.25\text{ s}$ 时间内自动分闸,隔离故障区段,保证上级开关设备再次重合成功,使其它无故障线路正常供电,同时掉牌或跌落显示,便于事故处理人员确认故障区段。若在达到其整定的计数前,上级开关设备重合成功,分段器的记忆系统能在一定时间内自动清零,以备下次重新计数。分段器分闸、闭锁并掉牌或跌落后,需手动将其关合。

**类型** 自动分段器分单相、三相两种。额定电压为 $10\sim 35\text{ kV}$ 。控制方式有液压式、电子式两类。某些分段器还可按动作原理分为跌落式、重合式和组合式等。灭弧介质有绝缘油、真空和六氟化硫三种。

**使用特点** 使用自动分段器时须注意:①自动分段器的起动电流应为上级保护最小分闸电流的 $80\%$ 以下;②整定的计数至少应比上级保护整定的开断次数少一次;③记忆时间必须长于上级保护动作的总累计时间;④自动分段器可以串接使用,但前后级分段器在整定计数上应有区别。

自动分段器主要用于 $10\sim 35\text{ kV}$ 架空配电线路,若制造质量有保证,生产成本可降低,将在农村配电网和城市配电网中得到普遍应用。中国最近亦有使用。

#### 参考书目

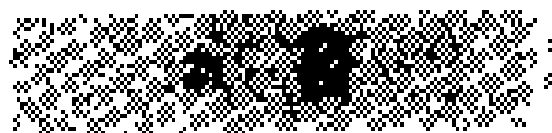
McGraw Edison Co. Power Systems Division  
Publication. Pittsburgh, 1978

NEI Reyrolle. Distribution Switchgear Publication.  
Newcastle, 1987

(纪瑞明)

zidong peidian kaiguan

**自动配电开关** (distribution automatic switch) 安装在配电线路电杆上的一种配电开关设备。一条配电线路,其送端装有自动重合器,并在几个分段处和分支线上各配有自动配电开关。自动配电开关与自动重合器相互配合,自动切除线路的故障段或故障分支线,从而保证健全段和健全分支线继续供电。



自动配电开关由开关本体、电源变压器、控制器三部分组成。开关本体作为开断与接通电源之用，可以关合短路电流，合分负荷电流，但不能开断短路电流。电源变压器用以接受电源侧信号，并提供开关合闸及保护电源、控制器的工作电源以及故障判别信号。自动配电开关既可用于单侧电源的配电线路，也可用于环网线路。当用于环网线路时，自动配电开关两侧都需装设电源变压器，以提供两侧的信号和电源。

自动配电开关的功能和作用与自动分段器相同。自动配电开关用于配电线路或其分支线分段，当线路发生永久性故障自动重合器跳开后，根据“无电压”信号自动隔离故障段或故障分支线；上级自动重合器重合后，即可恢复其他健全部分供电。当线路发生二次瞬时故障或自动配电开关合于潜伏故障时，自动按永久性故障处理。自动配电开关也可以通过相应的控制方式（如遥控等）达到控制负荷分配的目的。

自动配电开关是由电压信号的有无进行故障判断的。当线路有电压（自动重合器合闸开始送电）时，电源变压器受电后向控制器提供有电压信号，控制器按预先整定的合闸延迟时间控制自动配电开关合闸。该合闸延迟时间是根据需要自行设定的。当有多台自动配电开关串联使用时，前后级的自动配电开关按各自设定的合闸延迟时间合闸。当因故障或正常分断时，线路失电，所有自动配电开关同时分断，待恢复送电后按开始的动作顺序逐级合闸。

自动配电开关的故障判断是利用自动重合器合闸信号发出到线路无电压的时间长短来实现判断的。该时间称为自动配电开关的故障判别时间，在安装时给出该时间的整定值。当故障判别时间小于整定值时，控制器判断这次线路失电是由本开关合闸引起的，即认为有永久性故障存在，在电源再次恢复送电时，控制器不再发合闸信号即实现合闸闭锁。当线路中各自动配电开关处于正常运行状态，故障判别时间已大于整定值时，即使发生瞬时或永久性故障，也不进行计时比较，必须待下一次合闸时再判断。当自动配电开关在第一次合闸操作时已有故障存在，则按故障判别时间判断为故障段，不再执行下次合闸。

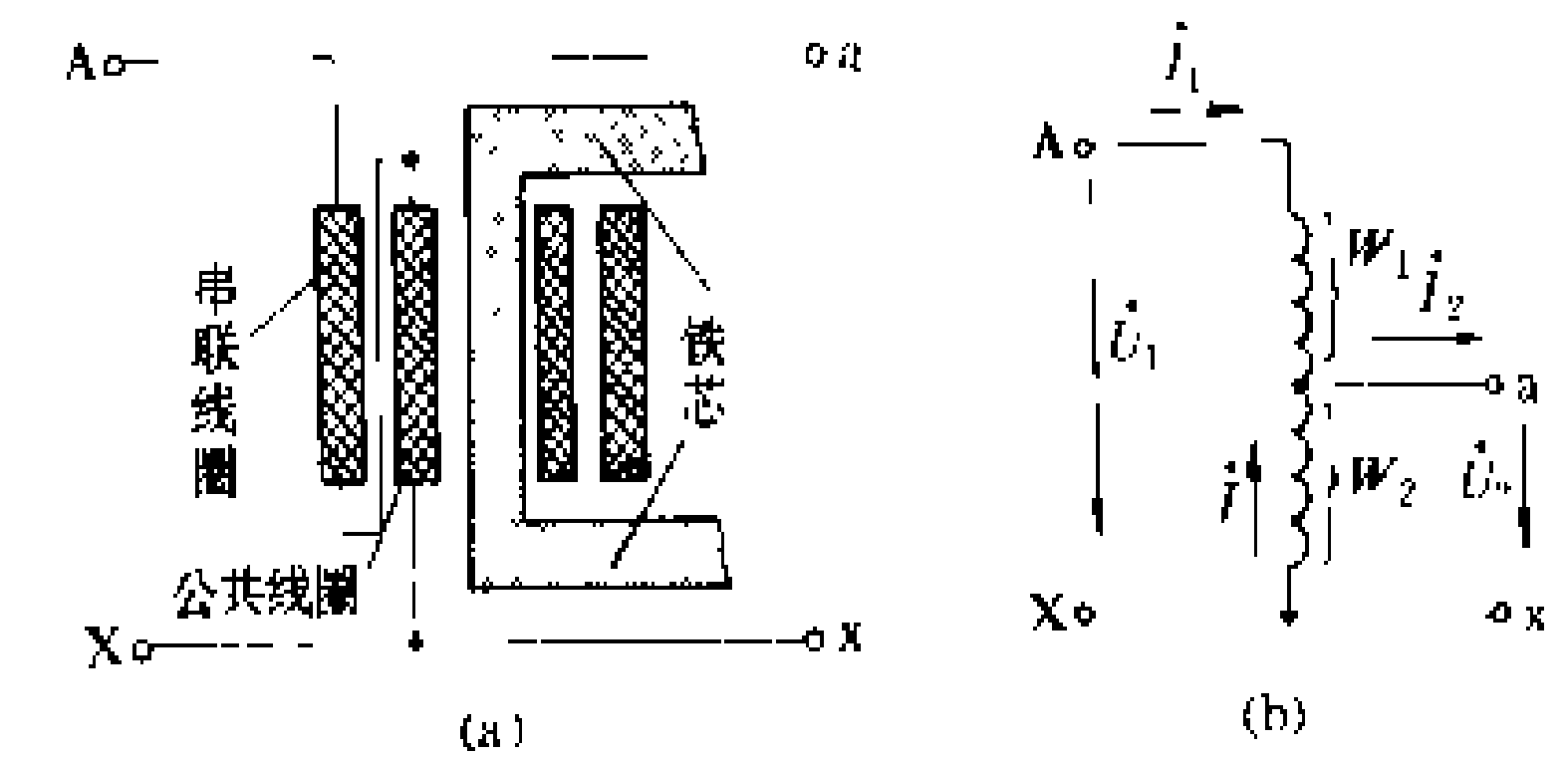
自动配电开关是以电压信号判断故障的，其机构设计无机械闭锁功能，由电源或电流变换后的励磁来保持自动配电开关在合闸位置。当无励磁时，则会自动分断，无论线路是否有故障，都必然会重新动作一次，从而增加了自动配电开关的动作次数。

（徐腊元）

ziou bianyaqi

自耦变压器（auto-transformer）至少

有两个绕组具有公共部分的变压器。自耦变压器中自耦连接（有公共部分）的两个绕组之间，除有磁的耦合外，还有电路上的联系，如图所示。图（b）中公共部分（a-x）的线圈称为公共线圈；（A-a）部分的线圈称为串联线圈。公共线圈为高低压绕组所共有。大容量自耦变压器一般还有一个独立的第三绕组。



自耦变压器绕组结构及电路原理图  
（a）结构示意图；（b）电路原理图

自耦变压器与普通变压器在原理上的不同点是：自耦变压器的二次绕组输出电流  $I_2$  除了通过磁感应从一次绕组传递外（即  $I_1$ ），其中有较大的一部分电流是直接由电源通过电路供给的（即  $I_1$ ）；而普通变压器的二次电流完全是通过磁感应传递的。由图（b）可作以下分析：自耦变压器的变比  $K_A = U_1/U_2 = I_2/I_1$ ；当忽略励磁电流时，自耦变压器的容量  $P_1 (=U_1 I_1) \approx P_2 (=U_2 I_2)$ ；在公共线圈中流过的电流  $I = I_2 - I_1$ ，由此可知自耦变压器的绕组容量（ $U_2 I$ ）小于其额定容量（ $U_2 I_2$ ），而普通双绕组变压器的绕组容量必须等于变压器的额定容量。

自耦变压器的绕组容量（又称电磁容量或结构容量）与额定（传输）容量之比称为自耦变压器的效益系数。效益系数  $k = U_2 I / (U_2 I_2) = I / I_2 = (I_2 - I_1) / I_2 = 1 - 1/K_A$ 。自耦变压器的变比  $K_A$  越接近 1 时，其效益系数  $k$  就越小，使用自耦变压器所获得的经济效果就越加显著。为了充分发挥自耦变压器的优越性，其变比不能太大，通常选择变比不大于 3。在各种绕组连接方法中，以星形连接的绕组电磁容量最小，因此自耦变压器一般采用星形连接方法。为了消除星形绕组中感应的三次谐波分量，通常还需要一个三角形连接的第三绕组。

由于自耦变压器绕组容量只是同容量普通变压器的  $k$  倍（ $k$  值总小于 1），可节省原材料并能降低损耗；又由于自耦变压器的体积和重量相对减少，有利于解决大型变压器的运输问题。自耦变压器的缺点有：①一、二次绕组有公共线圈和共用一个中性点，因此绕组连接方法要相同，中性点接地方式要求一致；②绕组间

漏磁场小,使短路阻抗相对较小,短路电流相应增大,发生外部短路时较易被损坏;③调压措施比普通变压器的复杂,如分接范围大,等效电磁容量会增加很多,有可能失去自耦连接的经济效益优势。

参见彩图插页第15页46图。

(凌 悠)

ziran gonglu

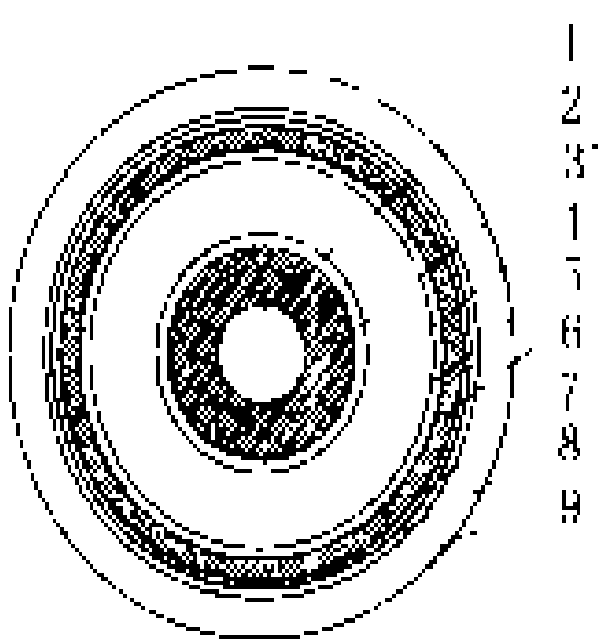
**自然功率** (surge impedance load, SIL; natural load) 见输电容量。

zirongshi chongyou dianlan

**自容式充油电缆** (self-contained oil-filled cable) 利用补充浸渍原理消除绝缘层中形成的气隙以提高工作场强的一种电力电缆。它通常用于电压等级高于35 kV的电力电缆线路中。充油电缆一般具有与供油设备(如压力供油箱、重力供油箱等)相连通的油道(见充油电缆供油装置)。当电缆温度升高时,膨胀的油经油道流至供油设备。当电缆温度下降时,供油设备中的油又经油道对电缆绝缘层进行补充。这样既消除了绝缘层中气隙的产生,又防止在电缆中产生过高的油压力。为提高绝缘层的电气强度,充油电缆中的油压均高于大气压力。按内部工作油压的大小不同,充油电缆可分为高压、中压和低压三种,它们的工作油压范围分别为1~1.5 MPa、0.4~0.8 MPa和0.02~0.3 MPa。按电缆线芯数的不同,充油电缆也分为单芯和三芯两种。

单芯自容式充油电缆的结构如图所示,它主要由油道、导体、绝缘、金属护套和加强带等组成。

油道和导体 单芯充油电缆的油道一般在导体的中心(如图),仅少数在金属护套下。三芯充油电缆的油道一般在三个线芯之间。导体中空油道一般由镀锡铜带或不锈钢带绕成螺旋管状作为导体的支撑,在该支撑外再绞合多层圆形铜线,形成中空导体。另一种中空导体由Z形或弓形型线绞合构成。Z形的制造简单,可



单芯自容式充油电缆结构

1—油道; 2—导线; 3—导线屏蔽; 4—绝缘层; 5—绝缘屏蔽; 6—铅套; 7—内衬垫; 8—加强层; 9—外护层

弯曲性好,但油流阻力大;弓形的导体表面光滑,油流阻力小,但弯曲性能较差,不利于制造大截面导体。油道内径一般为12~18 mm。当导体截面大于600 mm<sup>2</sup>时,常采用分割导体结构,称作密里根型导体,即由几个用电缆纸分隔的扇形导体绞合在油道外构成,以降低集肤效应,提

高导体的载流能力。

绝缘 由较薄的电缆纸和粘度较低的电缆油组成。经过干燥浸渍后的纸绝缘,纸的含水量在0.1%以下,油的含水量小于10 ppm,不但降低了介质损耗因数,并且提高了绝缘的电气强度,适用于电场强度较高(一般可达10~16 MV/m)的电缆。

金属护套和加强带 充油电缆都采用金属护套。用铅合金制作的金属护套,日久仍会发生蠕变,因此必须在铅套外用黄铜带或不锈钢带加固。用铝制作的金属护套,由于弯曲性能差,通常都加工成波纹铝套。

发展过程及趋势 1923年美国在克利夫兰(Cleveland)敷设了第一根66 kV单芯充油电缆,1932年意大利在米兰安装了220 kV充油电缆,至1974年,美国又在大古力水电站敷设了第一根525 kV单芯充油电缆。半个多世纪以来,充油电缆运行情况良好,是较高电压等级的电力电缆颇有发展前途的一个品种。但是充油电缆的油,容易燃烧失火,因此在20世纪70年代后,较低电压等级的充油电缆逐渐被固体挤压聚合电缆代替。为了克服充油电缆绝缘油易燃的缺点,目前已在研制不燃绝缘油并取得了成功。

参见彩图插页第29页90图。

参考书目

刘子玉, 电气绝缘结构设计原理, 北京: 机械工业出版社, 1981  
郑肇骞, 王焜明主编, 高压电缆线路, 北京: 水利电力出版社, 1983

(桑纪明)

zuran dianlan

**阻燃电缆** (flame retardent cable) 见电缆防火。

zuhe dianqi

**组合电器** (composite apparatus) 由断路器、高压熔断器、电流互感器、电压互感器、隔离开关、母线接地开关、母线及避雷器等设备(或其中的一部分)按照变电所电气主接线的要求组合在一起承担电能传递和切换任务的成套装置。既可设在户外,也可装在户内。组合电器中的各设备相互配合,有机地结合成一个整体。各个设备可以按照不同的技术要求来拼接,能够方便地拆卸、延伸和扩大。

按照型式不同可分为敞开式组合电器和气体绝缘金属封闭电器。后者在结构型式和内部绝缘介质方面与常规电器相比有重大变革,采用积木式结构并将各设备组合成一个整体,置于密封的金属容器中,容器内部充以一定压力的高绝缘气体(目前大多数使用



SF<sub>6</sub> 气体), 其绝缘特性不受外界环境污秽和湿度等因素的影响。

与常规电器相比, 组合电器的优点是: 能缩小变电所的占地面积, 减少现场安装工作, 缩短了建设工期, 简化了变电所的接线, 事故率也相应减小。另一方面, 组合电器一旦发生事故, 恢复送电的时间要长一些。在价格上, 敞开式组合电器与常规电器相比没有大的差别, 而气体绝缘金属封闭电器的价格一般为常规电器的 1.5~2.0 倍。在土地价格昂贵的大城市、开关站场地面积受到限制的水电站以及严重污秽地区, 通常要根据技术经济比较优先考虑使用相应的组合电器。

组合电器是从 20 世纪 50 年代开始发展起来的。60 年代后期, 封闭式组合电器发展很快。近年来, 国际上和中国均有了统一的标准和技术条件, 也有成套的试验设备和安装维护工作所需的专用工具、设备和仪器。初期, 组合电器是由高电压向超高压方向发展, 而后, 中、低压等级的组合电器也得到迅速发展。到 80 年代, 10~35 kV 电压等级的封闭式组合电器相继出现, 并开始与常规电器竞争。在中、高压电网中, 封闭式组合电器在城市配电网及大型水电站内愈来愈广泛地得到应用。

(黄维枢)

条 目 汉 字 笔 画 索 引

说 明

- 一、本索引供读者按条目标题的汉字笔画查检条目。
- 二、条目标题按第一字的笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的字按起笔笔形一(横)、丨(竖)、丿(撇)、丶(点)、㇀(折，包括㇀㇁等)的顺序排列。第一字相同的，依次按后面各字的笔画数和起笔笔形顺序排列。
- 三、用罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的条目标题依次排在汉字开头的条目标题的后面。
- 四、参见条(虚条)的页码采取虚实条兼注的方式，即参见条页码在括号外，被参见条页码在括号内。

一画  
[一]

一个半断路器接线 ..... 474

[㇀]

乙丙橡胶电缆 ..... 475

二画  
[丿]

人工污秽试验 ..... 364  
入口电容 ..... 365

三画  
[一]

三分之四断路器接线 ..... 367  
三柱式隔离开关 ..... 368  
干式变压器 ..... 159  
干试验 ..... 159  
土壤电阻率 ..... 442  
工频过电压 ..... 192  
工频耐受电压 ..... 193  
下行雷 ..... 450(309)  
大功率实验站 ..... 81  
大功率试验 ..... 82  
大功率试验方法 ..... 84  
大功率试验参数 ..... 83  
大古力 525kV 电缆工程 ..... 85  
大电流断路器 ..... 81

[丨]

上行雷 ..... 368

上海闸北—杨树浦电缆  
工程 ..... 368

[㇀]

马尼夸根—蒙特利尔输电  
线路 ..... 318

四画  
[一]

丰满—李石寨输电线路 ..... 155  
开关柜 ..... 297  
开关柜试验 ..... 297  
开关站 ..... 298  
开断与关合试验 ..... 295  
开断电容负载过电压 ..... 295  
开断电感负载过电压 ..... 294  
天津北郊 500 kV 变电所 ... 434  
元宝山—锦州—辽阳输电  
线路 ..... 480  
无人值班变电所 ..... 448  
支柱绝缘子 ..... 484  
不滴流电缆 ..... 60  
太平洋联络线 ..... 432  
区域变电所 ..... 362

[丨]

少油断路器 ..... 369  
日本东京电力公司 500 kV  
变电所 ..... 364  
中压架空配电线路 ..... 527  
中压配电网 ..... 528  
中国电力建设研究所线路  
杆塔实验站 ..... 526

中国电力科学研究院大功  
率实验站 ..... 526  
中性点电抗器 ..... 527  
中型屋外配电装置 ..... 527  
灭弧龙法 ..... 3(433)  
内绝缘 ..... 323  
内部过电压 ..... 321  
内部过电压测量 ..... 321

[丿]

手车式开关柜 ..... 371  
气体绝缘金属封闭电器 ..... 359  
气体绝缘金属封闭电器  
布置 ..... 360  
气体绝缘金属封闭电器  
电缆终端 ..... 360  
升压变压器 ..... 369  
反击 ..... 152  
反变换过电压 ..... 152  
介质损耗因数测量 ..... 276  
分支电缆接头 ..... 155  
分铅型电缆 ..... 154  
分流系数 ..... 154  
分裂导线 ..... 153  
分裂变压器 ..... 152

[丶]

六氟化硫绝缘变压器 ..... 313  
六氟化硫断路器 ..... 312

[㇀]

双母线分段带旁路母线  
接线 ..... 428

双母线分段接线 ..... 428  
双母线带旁路母线接线 ..... 428  
双母线接线 ..... 429  
双柱式隔离开关 ..... 429  
双断路器接线 ..... 427

五画  
[一]

击穿保险器 ..... 233  
正变换过电压 ..... 484(330)  
可控饱和电抗器型  
    静止补偿装置 ..... 298  
平顶山—武昌输电线路 ..... 356  
平波电抗器 ..... 356

[1]

卡布拉巴萨直流输电  
    工程 ..... 294  
北京电缆隧道工程 ..... 2  
电力电缆 ..... 127  
电力电缆线路 ..... 127  
电力变压器 ..... 123  
电气主接线 ..... 132  
电气设备抗震 ..... 131  
电气设备绝缘水平 ..... 130  
电气测量仪表 ..... 129  
电气装置防雷 ..... 133  
电容互感器 ..... 135  
电压互感器饱和过电压 ..... 136  
电压分布试验 ..... 134  
电抗器 ..... 97  
电抗器试验 ..... 98  
电抗器保护 ..... 98  
电花仪 ..... 96  
电晕试验 ..... 137  
电晕试验笼 ..... 138  
电流互感器 ..... 128  
电容传递过电压 ..... 134  
电缆分支箱 ..... 104  
电缆电场应力 ..... 101  
电缆电磁场 ..... 102  
电缆电磁屏蔽 ..... 102  
电缆安装 ..... 99  
电缆安装机具 ..... 99  
电缆导体连接 ..... 100  
电缆防火 ..... 103  
电缆防火带 ..... 104(103)  
电缆防火槽 ..... 104  
电缆应力锥 ..... 120  
电缆沟敷设 ..... 108  
电缆层敷设 ..... 100

电缆直埋敷设 ..... 121  
电缆软接头 ..... 113  
电缆供油装置允许供油  
    压力计算 ..... 107  
电缆线路电气参数 ..... 115  
电缆线路外力破坏防护 ..... 118  
电缆线路交接试验 ..... 116  
电缆线路设计 ..... 118  
电缆线路巡视检查 ..... 119  
电缆线路运行维护 ..... 119  
电缆线路技术资料 ..... 115  
电缆线路控制电缆 ..... 117  
电缆线路路径选择 ..... 117  
电缆终端 ..... 122  
电缆故障 ..... 108  
电缆故障修理 ..... 110  
电缆故障搜寻 ..... 108  
电缆牵引端 ..... 113  
电缆竖井敷设 ..... 114  
电缆选型 ..... 119  
电缆屏蔽系数 ..... 112  
电缆配电网 ..... 111  
电缆预防性试验 ..... 121  
电缆排管敷设 ..... 111  
电缆接头 ..... 110  
电缆蛇形敷设 ..... 113  
电缆隧道敷设 ..... 114  
电缆敷设计算 ..... 104  
四极法 ..... 430

[J]

代表档距 ..... 85  
用户变电所 ..... 479  
额定负荷过电压 ..... 427  
外绝缘 ..... 445

[、]

主变压器选择 ..... 530  
主放电 ..... 531(309)  
半高型屋外配电装置 ..... 2

[マ]

加拿大皮斯河流域 500 kV  
    变电所 ..... 233  
母线选择 ..... 319  
母线接地开关 ..... 319

六画  
[一]

地下变电所 ..... 96

地区变电所 ..... 96  
过电压 ..... 195  
过电压计算 ..... 196  
过电压模拟 ..... 196  
过渡电缆接头 ..... 197  
西安高压电器研究所大  
    功率实验站 ..... 450  
压气 (SF<sub>6</sub>) 绝缘电缆 ..... 474  
列宁格勒国立工业大学  
    高电压实验室 ..... 311

[1]

同步调相机 ..... 436  
同步调相机运行控制 ..... 442  
同步调相机励磁 ..... 438  
同步调相机试验 ..... 441  
同步调相机故障 ..... 437  
同步调相机起动方法 ..... 440  
同步调相机继电保护 ..... 438  
同步调相机检修 ..... 438  
回流方式 ..... 232  
网络试验站 ..... 445  
网格法 ..... 445

[J]

先导 ..... 451(309)  
伏尔加格勒—莫斯科  
    输电线路 ..... 156  
自动分段器 ..... 533  
自动重合器 ..... 532  
自动配电开关 ..... 533  
自饱和电抗器型静止  
    补偿装置 ..... 531  
自容式充油电缆 ..... 535  
自然功率 ..... 535(372)  
自耦变压器 ..... 534  
伊尔河非同步联络站 ..... 474  
伊泰普直流输电  
    工程 ..... 475  
行波 ..... 467  
舟山直流输电工程 ..... 529  
全波冲击绝缘水平 ..... 362  
全封闭母线选择 ..... 363  
合闸过电压 ..... 200  
危险波曲线 ..... 446  
负荷开关 ..... 156  
多角形接线 ..... 147  
多油断路器 ..... 147  
多端直流输电系统 ..... 145  
多端直流输电系统  
    控制 ..... 146

## [、]

冲击电压发生器 .....	66
冲击电压试验 .....	67
冲击电流发生器 .....	65
冲击同步发电机试验站 .....	68
冲击接地阻抗 .....	68
刘家峡—关中输电 除铜	8 力
线路 .....	312
交直流输电并联运行 .....	267
交流电压试验 .....	264
交流仪表 .....	265
交流地网 .....	264
交联聚乙烯电缆 .....	263
充气电缆 .....	70
充电装置 .....	69
充油电缆安装 .....	70
充油电缆供油装置 .....	71
充油电缆油路分段 .....	72
并联电抗器 .....	51
并联电抗器运行检修 .....	54
并联电抗器试验 .....	53
并联电抗器继电保护 .....	52
并联电抗器控制装置 .....	53
并联电容器 .....	54
并联电容器试验 .....	56
并联电容器组一次配套 设备 .....	58
并联电容器组成套装置 .....	56
并联电容器组运行维护 .....	59
并联电容器组继电保护 .....	56
并联电容器组接线 .....	57
并联电容器组控制装置 .....	58
并联补偿装置 .....	46
污闪 .....	446
江苏横山 220 kV 变 电所 .....	262
农村配电网 .....	324

## [ ]

导引电缆 .....	93
导线长期允许电流 .....	88(379)
导线次档距振荡 .....	88
导线经济电流密度 .....	92
导线脱冰跳跃 .....	92
导线覆冰舞动 .....	88

## 七画

### [一]

远离法 .....	481(272)
-----------	----------

远距离输电 .....	480
苏联北方大功率实验站 .....	430
苏联直流输电研究院高压 技术部 .....	431
杆上变压器 .....	159
杆上断路器 .....	160
杆上隔离开关 .....	160
杆塔 .....	160
杆塔设计 .....	168
杆塔组立 .....	170
杆塔组立施工机具 .....	172
杆塔基础 .....	162
杆塔基础设计 .....	164
杆塔基础施工 .....	166
杆塔基础施工机具 .....	167
两线一地制配电 .....	310
连续地线 .....	310

## [ | ]

串联补偿系统谐振 .....	73
串联补偿装置 .....	74
串联补偿装置运行检修 .....	76
串联补偿装置试验 .....	76
串联补偿装置保护 .....	75

## [ J ]

低压架空配电线路 .....	94
低压配电网 .....	95
低温有阻电缆 .....	94
迎面先导 .....	478(309)

## [、]

冷缩电缆终端 .....	310
快速接地开关 .....	302
补偿法 .....	60

## [ ]

局部放电试验 .....	287
阻燃电缆 .....	535(103)

## 八画

### [一]

环网开关柜 .....	201
环氧电缆终端 .....	201
武汉高压研究所高压实 验室 .....	449
英法海峡直流输电工程 .....	477
直击雷过电压 .....	484
直线电缆接头 .....	525
直流电压互感器 .....	486

直流电压试验 .....	486
直流电流互感器 .....	485
直流电缆 .....	484
直流电缆线路 .....	485
直流仪表 .....	524
直流线路电参数 .....	521
直流线路故障 .....	523
直流线路振荡阻尼 电路 .....	524
直流架空线路 .....	489
直流高压发生器 .....	488
直流断路器 .....	487
直流输电 .....	490
直流输电工程系统试验 .....	495
直流输电与交流输电 .....	519
直流输电电磁与环境 影响 .....	494
直流输电运动通信设施 .....	520
直流输电系统计算 .....	504
直流输电系统可靠性 .....	509
直流输电系统动态模拟 .....	502
直流输电系统过电压 .....	503
直流输电系统仿真 装置 .....	502
直流输电系统自动再 起动 .....	518
直流输电系统运行特性 .....	516
直流输电系统运行维护 .....	517
直流输电系统绝缘配合 .....	508
直流输电系统起停 .....	512
直流输电系统继电保护 .....	506
直流输电系统控制 .....	510
直流输电系统谐波 .....	514
直流输电系统数字仿真 .....	513
直流输电线路 .....	519
直流输电接地电极 .....	497
直流输电控制方式 .....	498
直流输电控制系统分层 结构 .....	500
直流输电联网功能 .....	501(519)
枢纽变电所 .....	372
软母线选择 .....	365

## [ | ]

非全相运行过电压 .....	152
固体挤压聚合电缆 .....	194

## [ J ]

供电方式 .....	193
爬电比距 .....	327
彼得逊法则 .....	4

## [、]

变电所 .....	9
变电所二次回路 .....	13
变电所二次回路电源 .....	16
变电所布置 .....	11
变电所电缆选择 .....	12
变电所电磁与环境 影响 .....	12(409)
变电所主接线可靠性 .....	31
变电所主控制楼 .....	32
变电所自用电 .....	33
变电所自动化 .....	33
变电所污秽分级 .....	27
变电所污秽闪络 .....	28
变电所污秽测定 .....	26
变电所设备选择 .....	24
变电所防火与防爆 .....	18
变电所防污型绝缘子 .....	21
变电所防污涂剂 .....	20
变电所防雷 .....	18
变电所运动装置 .....	28
变电所运行维护 .....	30
变电所技术经济指标 .....	22
变电所所址 .....	25
变电所带电水冲洗 .....	12
变电所带电作业 .....	12
变电所通信 .....	26
变电所继电保护 .....	22
变电所接地装置 .....	23
变电所辅助设施 .....	21
变电所照明 .....	30
变电所噪声 .....	30
变电金具 .....	7
变压器安装 .....	35
变压器运行 .....	45
变压器运输 .....	44
变压器冷却 .....	40
变压器油 .....	43
变压器试验 .....	41
变压器故障 .....	38
变压器保护 .....	37
变压器调压装置 .....	41
变压器接线组别 .....	39
变压器维护检修 .....	43
变像仪 .....	35
单母线分段带旁路母线 接线 .....	86
单母线分段接线 .....	86
单母线接线 .....	86
单芯电缆护层过电压	

保护 .....	87
单柱式隔离开关 .....	87
法国电力公司高压 实验室 .....	151
油浸纸绝缘电缆 .....	479
波阻抗 .....	60
波变形 .....	59
波速 .....	60
波衰减 .....	59
空气压缩系统 .....	299
空气断路器 .....	299
试验变压器 .....	370
试验线段 .....	371

## [→]

弧光接地过电压 .....	200
降阻系 .....	262
限流电抗器 .....	451
限流电抗器选择 .....	451
参数谐振过电压 .....	61
线性谐振过电压 .....	462
线路力学实验站 .....	462
线路导线试验 .....	452
线路防雷 .....	453
线路杆塔试验 .....	456
线路杆塔基础试验 .....	455
线路金具试验 .....	458
线路绝缘水平 .....	459
组合电器 .....	535
终端变电所 .....	529
经济输送容量 .....	278(372)

## 九画

### [一]

封闭式开关柜 .....	155
城市配电网 .....	63
带绝缘电缆 .....	85
相模变换法 .....	464
相序翻转 .....	465(144)
耐火电缆 .....	321(103)
耐雷水平 .....	321

### [ ]

背靠背直流耦合系统 .....	3
临界档距 .....	311(250)
哈尔滨龙厄—海尔辛堡 输电路 .....	198

### [ ]

钢管电缆 .....	176
------------	-----

钢管压气电缆 .....	176
钢管充油电缆 .....	175
复合电压试验 .....	157
复合避雷器 .....	157
保护间隙 .....	2

## [、]

阀厅 .....	150
阀电流断点检测装置 .....	149
阀式避雷器 .....	149
美国电力研究所输电线路 力学实验场 .....	318
逆变侧交流电网故障 .....	323

## [→]

屋内配电装置 .....	446
屋外配电装置 .....	447
屏蔽型电缆 .....	357
陡度仪 .....	139
架空电缆 .....	236
架空地线 .....	233
架空地线截面选择 .....	234
架空线 .....	248
架空线力学计算 .....	250
架空线永久性伸长 .....	256
架空线状态方程式 .....	257(250)
架空线微风振动 .....	253
架空配电线路设计施工 .....	237
架空输电线路 .....	240
架空输电线路可靠性 .....	244
架空输电线路设计勘测 .....	245
架空输电线路金具 .....	241
架线施工 .....	257
架线施工机具 .....	261
绕击电气几何模型 .....	364
绝缘子 .....	293
绝缘水平 .....	293
绝缘电阻测量 .....	290
绝缘电缆接头 .....	290
绝缘导线 .....	289
绝缘寿命试验 .....	292
绝缘配合 .....	291
绝缘配合统计法 .....	292
绝缘配合惯用法 .....	291
绝缘配合简化统计法 .....	291

## 十画

### [一]

振荡回路试验站 .....	483
换相 .....	229
换流 .....	202



换流电路 .....	205
换流变压器 .....	203
换流单元 .....	204
换流阀 .....	205
换流阀触发系统 .....	207
换流站 .....	221
换流站开关设备 .....	225
换流站无功功率补偿	
设备 .....	226
换流站平面布置 .....	226
换流站主接线 .....	227
换流站冲击波吸收电	
容器 .....	222
换流站交流部分故障 .....	223
换流站交流滤波装置 .....	224
换流站直流滤波装置 .....	227
换流站高频阻塞装置 .....	223
换流站辅助设施 .....	222
换流站避雷器 .....	221
换流器 .....	209
换流器工况图 .....	213
换流器闭锁和解锁 .....	212
换流器运行特性 .....	219
换流器故障 .....	215
换流器旁路 .....	218
换流器触发相位控制 .....	212
热缩电缆终端 .....	364
埃基巴斯图兹—车里雅	
宾斯克输电线路 .....	1
埃基巴斯图兹—苏联欧洲	
部分中心直流输电工程 .....	1
荷兰 KEMA 大功率实	
验站 .....	200
真空接触器 .....	483
真空断路器 .....	482
桥形接线 .....	362
格式网络 .....	186
哥得兰直流输电工程 .....	186
配电网 .....	331
配电网无功补偿 .....	347
配电网日负荷率 .....	346
配电网中性点接地方式 .....	348
配电网计算机辅助管理 .....	343
配电网电压调整 .....	334
配电网电压等级 .....	334
配电网电能损耗 .....	333
配电网负荷曲线 .....	338
配电网负荷同时率 .....	341
配电网负荷特性 .....	339
配电网负荷预测 .....	341
配电网负荷密度 .....	338

配电网规划 .....	342
配电网故障 .....	342
配电网结构 .....	344
配电网容载比 .....	347
配电网调度自动化 .....	337
配电网调度运行 .....	336
配电网调度所 .....	335
配电自动化 .....	354
配电变电所 .....	327
配电变电所运行检修 .....	328
配电变电所噪声 .....	330
配电变压器防雷 .....	330
配电线路 .....	349
配电线路防雷设施 .....	351
配电线路运行检修 .....	352
配电线路低压绝缘子 .....	350
配电装置 .....	353
套管 .....	432

[ 1 ]

紧凑型输电线路 .....	277
---------------	-----

[ ) ]

铁磁谐振过电压 .....	435
特性线法 .....	433

[ 、 ]

高电压实验室 .....	178
高电压实验室屏蔽 .....	179
高电压实验室接地 .....	179
高电压测量装置 .....	177
高电压谐振试验装置 .....	180
高压开关设备联锁	
装置 .....	184
高压电力设备绝缘	
试验 .....	181
高压电器无线电干扰	
试验 .....	183
高压架空配电线路 .....	183
高压配电网 .....	185
高压熔断器 .....	185
高型屋外配电装置 .....	181
高速摄影机 .....	180
瓷横担 .....	77
消弧线圈 .....	465
消雷器 .....	466
海底电缆 .....	198
海底电缆敷设 .....	198

[ 7 ]

预制电缆终端 .....	479
--------------	-----

## 十一画

[ 一 ]

球雷 .....	362
接户线与进户线 .....	274
接地 .....	268
接地电阻 .....	270
接地电阻测量 .....	272
接地变压器 .....	269
接地装置 .....	273
接触电压 .....	267
接触电动势 .....	267(267)
控制电缆 .....	300
辅助电缆 .....	156

[ 1 ]

悬式绝缘子 .....	471
-------------	-----

[ ) ]

象鼻电缆终端 .....	465
--------------	-----

[ 、 ]

旋转电机防雷 .....	472
粘性浸渍纸绝缘电缆 .....	323
断线谐振过电压 .....	144
断路器 .....	139
断路器失灵保护 .....	142
断路器试验 .....	142
断路器选择 .....	143
断路器操动机构 .....	140
谐振过电压 .....	466

## 十二画

[ 一 ]

超导电缆 .....	62
葛洲坝—上海直流输电	
工程 .....	190
厦门集美—高崎海底电	
缆工程 .....	450
硬母线选择 .....	478
暂时过电压 .....	482

[ 1 ]

敞开式开关柜 .....	62
敞开式组合电器 .....	62
晶闸管阀辅助电路 .....	278
晶闸管投切电容器型静止	
补偿装置 .....	281
晶闸管控制电抗器型静止	
补偿装置 .....	280

晶闸管控制变压器型静止  
补偿装置 ..... 280  
跌落式熔断器 ..... 138

[ J ]

等值减法则 ..... 94

[ 、 ]

普通型式避雷器 ..... 357  
湿试验 ..... 370

[ 丿 ]

隔离开关 ..... 188  
隔离开关试验 ..... 189  
隔离开关选择 ..... 189  
隔离开关操动机构 ..... 189

十三画

[ 一 ]

蓄电池 ..... 468  
感应雷过电压 ..... 175  
雷云 ..... 309  
雷云放电过程 ..... 309  
雷击跳闸率 ..... 308  
雷击 ..... 304  
雷击过电压 ..... 308  
雷电观测 ..... 306  
雷电观测站 ..... 306  
雷电定位系统 ..... 306(306)  
雷电参数 ..... 304  
雷纳第大功率实验站 ..... 308  
雷电 ..... 419  
输电网络 ..... 373  
输电线路干扰影响 ..... 389  
输电线路无线电干扰 ..... 403  
输电线路可听噪声 ..... 397  
输电线路电气设计 ..... 386  
输电线路电气参数 ..... 381  
输电线路电场 ..... 383  
输电线路电晕 ..... 386  
输电线路危险影响 ..... 401  
输电线路交叉跨越 ..... 394  
输电线路污秽等级 ..... 403(394)  
输电线路设计气象条件 ..... 399  
输电线路导线换位 ..... 377  
输电线路导线截面选择 ..... 379  
输电线路防雷设计 ..... 389  
输电线路巡视检测 ..... 404  
输电线路技术经济指标 ..... 393  
输电线路阻抗耦合影响 ..... 406

输电线路环境电磁 ..... 393  
输电线路定位 ..... 388  
输电线路带电作业 ..... 375  
输电线路故障 ..... 391  
输电线路绝缘子 ..... 397  
输电线路绝缘设计 ..... 394  
输电线路容性耦合影响 ..... 399  
输电线路通道 ..... 400  
输电线路接地设计 ..... 394(273)  
输电线路维修 ..... 402  
输电线路感性耦合影响 ..... 391  
输电线路路径选择 ..... 398  
输电线路磁场 ..... 374  
输电容量 ..... 372  
输配 ..... 407  
输配电电压等级 ..... 411  
输配电电磁与环境的影响 ..... 409  
输配电网的无功补偿与  
电压调整 ..... 426  
输配电设施与环境协调 ..... 425  
输配电技术经济 ..... 419  
输配电技术标准 ..... 412  
输配电技术展望 ..... 420  
输配电简史 ..... 423

[ 丨 ]

跨步电压 ..... 301  
跨步电势 ..... 301(301)  
路灯灯具 ..... 313  
路灯供电方式 ..... 314  
路灯控制 ..... 315  
路灯照明 ..... 316

[ 丿 ]

魁北克水电局研究所大功  
率实验站 ..... 302  
魁北克水电局研究所高压  
实验室 ..... 303  
魁北克—新英格兰直流  
互联系统 ..... 303  
解列过电压 ..... 275

[ 、 ]

新仁浓变频站 ..... 467  
意大利电工技术试验中心  
大功率实验站 ..... 476  
意大利电工技术试验中心  
高压实验室 ..... 476  
意大利 Lecco 铁磁实验站 ..... 476  
塞止电连接头 ..... 367

十四画

[ 一 ]

静止无功发生器 ..... 286  
静止补偿装置 ..... 282  
静止补偿装置运行检修 ..... 286  
静止补偿装置试验 ..... 285  
静止补偿装置继电保护 ..... 284  
静止补偿滤波装置 ..... 282  
截波冲击绝缘水平 ..... 275  
截波装置 ..... 275  
聚乙烯电缆 ..... 288  
聚氯乙烯电缆 ..... 288  
磁吹断路器 ..... 79  
磁吹避雷器 ..... 78  
磁钢棒 ..... 79

[ 丨 ]

管式避雷器 ..... 195

十五画

[ 一 ]

耦合地线 ..... 326  
耦合系数 ..... 326

[ 丿 ]

箱式变电站 ..... 463  
德国法兰克福 420 kV 西南  
变电所 ..... 93

[ 、 ]

潜供电弧 ..... 361  
潮流反转 ..... 63

十六画

[ 一 ]

操作过电压 ..... 62  
操作冲击绝缘水平 ..... 61  
整流侧交流电网故障 ..... 483

[ 丿 ]

避雷针 ..... 6  
避雷线 ..... 5  
避雷器 ..... 4  
避雷器试验 ..... 4

十七画

[ 丨 ]

繁昌 500 kV 变电所 ..... 151  
V 型瓷隔离开关 ..... 444

# 条 目 外 文 索 引

## (INDEX OF ARTICLES)

### A

AC harmonic filters in  
  convertor station ..... 224  
AC part faults of convert-  
  or station ..... 223  
aerial cable ..... 236  
aerolian vibration of over-  
  head line ..... 253  
air circuit breaker ..... 299  
alternating current  
  grounding grid ..... 264  
alternating current in-  
  struments ..... 265  
alternating voltage  
  tests ..... 264  
anti - fire and anti - ex-  
  plosion in substation ... 18  
anti-pollution coating for  
  substation ..... 20  
anti - pollution type insu-  
  lators of substation ..... 21  
arcing ground over-  
  voltage ..... 200  
arc - suppression coil ..... 465  
arrangement of gas insu-  
  lated switchgear ..... 360  
arrangement of GIS ..... 360  
arresters in convertor  
  station ..... 221  
artificial pollution  
  tests ..... 364  
audible noise of trans-  
  mission lines ..... 397  
automatic circuit  
  recloser ..... 532  
automatic line section-  
  alizer ..... 533  
automatic restart of DC  
  transmission system ... 518  
automation of sub-  
  station ..... 33

auto - transformer ..... 534  
auxiliary cable ..... 156  
auxiliary circuit of thy-  
  ristor valve ..... 278  
auxiliary equipments of  
  convertor station ..... 222  
auxiliary facilities of  
  substation ..... 21

### B

back - to - back DC  
  coupling system ..... 3  
ball lightning ..... 362  
Beijing cable tunnel  
  project ..... 2  
belted type cable ..... 85  
benefit due to intercon-  
  nection of power  
  systems ..... 501  
Bergeron's method ..... 3  
branch joint ..... 155  
breaker and a - half  
  configuration ..... 474  
breaker and one - third  
  configuration ..... 367  
bridge-circuit con-  
  figuration ..... 362  
brief history of power  
  transmission and dis-  
  tribution ..... 423  
bulk - oil circuit  
  breaker ..... 147  
bundle conductors ..... 153  
bushing ..... 432  
by-pass of convertor ..... 218

### C

cable circuit design ..... 118  
cable circuit operating and  
  maintenance ..... 119  
cable circuit technical  
  records ..... 115

cable conductor connec-  
  tion ..... 100  
cable corridor laying ..... 100  
cable direct burial  
  laying ..... 121  
cable external damage  
  protection ..... 118  
cable failure ..... 108  
cable failure repair ..... 110  
cable fault location ..... 108  
cable feeder pillar ..... 104  
cable fire protection ..... 103  
cable fireprotection  
  band ..... 104  
cable fireprotection  
  slot ..... 104  
cable HV routine test  
  after operating ..... 121  
cable installation ..... 99  
cable installation equip-  
  ments ..... 99  
cable joint ..... 110  
cable laying calcul-  
  ation ..... 104  
cable pothead ..... 122  
cable pulling eye ..... 113  
cable route inspection ... 119  
cable route selection ..... 117  
cable screening ..... 102  
cable screening factor ... 112  
cable shaft instal-  
  lation ..... 114  
cable shielding ..... 102  
cable snake instal-  
  lation ..... 113  
cable splice ..... 110  
cable stress relief cone ... 120  
cable termination ..... 122  
cable trench laying ..... 108  
cable tunnel laying ..... 114  
Cabora Bassa DC trans-  
  mission project ..... 294

calculation of the permissible pressure for cable oil feeding equipment .....	107	conductors & wires of overhead transmission line .....	248	coupling coefficient .....	326
capacitance coupling effects of transmission lines .....	399	conductor sleeting jump .....	92	coupling ground wire .....	326
capacitance switching - off overvoltage .....	295	conductor transposition of transmission line .....	377	covered conductor .....	289
capacitance - transfer overvoltage .....	134	configuration of distribution network .....	344	critical span .....	311
capacity-to-load ratio of distribution system ...	347	connection of transformer windings .....	39	cross - linked polyethylene insulated cable .....	263
charging device .....	69	construction for pole & tower foundations .....	166	cross - section selection of overhead ground wire .....	234
chopped wave impulse insulation level .....	275	consumer substation .....	479	cryo - resistive cable .....	94
chopping device .....	275	control building in substation .....	32	CSR .....	298
circuit - breaker .....	139	control cable .....	300	cubicle substation .....	463
circuit breaker failure relay protection .....	142	control cable of power cable line .....	117	current - limiting reactor .....	451
circuit breaker operating mechanism .....	140	controllable saturated reactor .....	298	current transformer .....	128
circuit - breaker selection .....	143	control of DC transmission system .....	510	curve of dangerous waves .....	446
circuit breaker tests .....	142	conventional method for insulation co-ordination .....	291		
city distribution system ...	63	conversion .....	202	daily load factor of distribution system .....	346
classification of pollution in substation .....	27	converter charts .....	213	damping circuit for DC transmission line oscillation .....	524
combined surge arrester .....	157	converter valve .....	205	danger effects .....	401
communication in substation .....	26	convertor .....	209	DC and AC transmissions .....	519
commutation .....	229	convertor blocking and deblocking .....	212	DC cable line .....	485
compact transmission line .....	277	convertor circuit .....	205	DC current transformer .....	485
compensating method .....	60	convertor faults .....	215	DC harmonic filters in convertor station .....	227
composite apparatus .....	535	convertor firing phase control .....	212	DC line electric parameters .....	521
compound voltage tests .....	157	convertor station .....	221	DC overhead line .....	489
compressed air system ...	299	convertor transformer ...	203	DC potential transformer .....	486
compressed gas insulated cable .....	474	convertor unit .....	204	DC transmission control modes .....	498
computation of DC transmission system .....	504	coordinations of power network facilities and their environments .....	425	DC transmission control faults .....	523
computer-aided management of distribution system .....	343	corona cage .....	138	DC transmission earthing electrode .....	497
		corona effect on transmission line .....	386	DC transmission line .....	519
		corona tests .....	137	DC transmission line faults .....	523
		counterpoise .....	310	DC transmission system operation & maintenance .....	517

DC transmission system			
reliability .....	509		
DC transmission system			
simulator .....	502		
detector of valve current			
interruption instant ...	149		
dielectric dissipation factor			
measurement .....	276		
digital simulation of DC			
transmission system ...	513		
direct current break-			
ers .....	487		
direct current cable .....	484		
direct current instru-			
ments .....	524		
direct current transmis-			
sion .....	490		
direct stroke lightning			
overvoltage .....	484		
direct transfer overvolt-			
age .....	484		
disconnecting switch .....	188		
dispatching automation in			
distribution system ...	337		
dispatching center of dis-			
tribution system .....	335		
dispatching operation of			
distribution system ...	336		
distant method .....	481		
distribution automatic			
switch .....	533		
distribution automa-			
tion .....	354		
distribution line .....	349		
distribution substation ...	327		
distribution substation			
noise .....	330		
distribution substation			
operation and main-			
tenance .....	328		
distribution system			
fault .....	342		
distribution system plan-			
ning .....	342		
district substation .....	96		
double breakers configur-			
ation .....	427		
double-bus configur-			
ation .....	429		
double - bus with auxiliary			
bus configuration .....	428		
double-post type discon-			
necting switch .....	429		
double wire - ground sys-			
tem for electric power			
distribution .....	310		
downward lightning .....	450		
drop - out fuse .....	138		
dry test .....	159		
dry type transformer .....	159		
duct cable laying .....	111		
dynamic modelling of DC			
transmission system ...	502		
earthing device .....	273		
earthing resistance .....	270		
earthing resistance			
measurement .....	272		
earthing switch for			
busbar .....	319		
earthing transformer .....	269		
earth-resistance-reducing			
agent .....	262		
earth resistivity .....	442		
economical capacity of			
power transmission ...	278		
economical current den-			
sity of line con-			
ductor .....	92		
Eel River asynchronous			
interconnection			
station .....	474		
electrical design of trans-			
mission line .....	386		
electrical measuring instru-			
ments .....	129		
electrical parameters of			
cable circuit .....	115		
electrical parameters of			
transmission line .....	384		
electric and magnetic			
field of power cable ...	102		
electric field of transmis-			
sion line .....	383		
electric power distribu-			
tion system .....	331		
electric stresses of power			
cable .....	101		
electro-geometrical model			
of detour stroke .....	364		
electromagnetic and en-			
vironment effect in			
power transmission			
and distribution .....	409		
electromagnetic environ-			
ment of transmission			
line .....	393		
electromagnetic environ-			
ment of DC trans-			
mission .....	494		
electromagnetic environ-			
ment of substation .....	12		
elephant cable ter-			
minal .....	465		
enclosed switchgear			
panel .....	155		
energization overvolt-			
age .....	200		
energy loss of distribu-			
tion system .....	333		
entrance capacitance .....	365		
epoxy resin cable ter-			
minal .....	201		
Erkibastuz - central area of			
European part of USSR			
HVDC project .....	1		
Erkibastuz - Cheliabinsk			
transmission line .....	1		
ethylene propylene rubber			
cable .....	475		
facing leader .....	478		
Fanchang 500 kV substa-			
tion .....	151		
faults of AC network			
on inverter side .....	323		
faults of AC network			
on rectifier side .....	483		
Fengman - Lishizhai trans-			

mission line ..... 155  
ferromagnetic bar ..... 79  
ferro-resonance overvolt-  
age ..... 435  
fire resisting cable ..... 321  
firing system of con-  
vertor valve ..... 207  
fittings of overhead trans-  
mission line ..... 241  
flame retardent cable ..... 535  
flashover in fog ..... 449  
flexible joint ..... 113  
forecast & suggestions on  
power transmission and  
distribution tech-  
niques ..... 420  
foundation design for  
pole & tower ..... 164  
four-terminal method ... 430  
full wave impulse insula-  
tion level ..... 362

## H

galloping of iced conduc-  
tor ..... 88  
gas - filled cable ..... 70  
gas insulated metalclad  
switchgear ..... 359  
gas insulated switchgear  
cable terminal ..... 360  
Gezhouba - Shanghai  
HVDC transmission  
project ..... 190  
GIC ..... 474  
GIS terminal ..... 360  
Gotland HVDC transmis-  
sion scheme ..... 186  
Grand Coulee 525kV cable  
project ..... 85  
grid network ..... 186  
grounding ..... 268  
grounding design of trans-  
mission line ..... 394  
grounding installation in  
substation ..... 23  
grounding of high voltage  
laboratory ..... 179

ground wire ..... 5

## H

harmful effects of transmis-  
sion lines ..... 401  
harmonic filters for static  
compensator ..... 282  
harmonics of DC trans-  
mission system ..... 514  
Harspranget - Halsingborg  
transmission line ..... 198  
heat shrinkable cable  
terminal ..... 364  
heavy current circuit  
breaker ..... 81  
Hengshan 220kV substa-  
tion of Jiangsu ..... 262  
hierarchy structure of DC  
transmission control  
system ..... 500  
high - arrangement of  
outdoor switchgear ... 181  
high power laboratories of  
Italian Electrical Exper-  
imental Centre ..... 476  
high power laboratory ..... 81  
high power laboratory at  
Les Renardieres ..... 308  
high power laboratory of  
EPRI, China ..... 526  
high power laboratory  
of HVARC of  
USSR ..... 430  
high power laboratory of  
Hydro - Quebec's  
Research Institute ..... 302  
high power laboratory of  
Xi'an High - Voltage  
Apparatus Research  
Institute ..... 450  
high power testing  
methods ..... 84  
high power tests ..... 82  
high speed cameras ..... 180  
high speed earthing  
switch ..... 302  
high voltage DC gener-

ator ..... 488  
high voltage distribution  
network ..... 185  
high voltage fuse ..... 185  
high voltage labora-  
tories ..... 178  
high voltage laboratories  
of Italian Electrical  
Experimental  
Centre ..... 476  
high voltage laboratory  
of Hydro - Quebec's  
Research Institute ..... 303  
high voltage laboratory  
of Leningrad State  
Technical Universi-  
ty ..... 311  
high voltage laboratory of  
National Electric  
Power Company of  
France ..... 151  
high voltage laboratory  
of Wuhan High  
Voltage Research  
Institute ..... 449  
high voltage measurement  
devices ..... 177  
high - voltage overhead  
distribution line ..... 183  
high voltage resonant  
circuit ..... 180  
high voltage switchgear  
interlocking device ..... 184  
High Voltage Technology  
Department of High  
Voltage Direct Current  
Power Transmission  
Research Institute  
of USSR ..... 431  
home - load supply of  
substation ..... 33  
hot-line maintenance in  
substation ..... 12  
H - type cable ..... 357  
HVDC simulator ..... 502

## I

ignition system of convert-

or valve .....	207	internal overvoltage .....	321	transmission line .....	453
image converter .....	35	internal overvoltage measurement .....	321	lightning rod .....	6
impulse current gener- ator .....	65	inverse stroke .....	152	lightning survey .....	306
impulse earth impe- dance .....	68	inverse transfer overvolt- age .....	152	lightning survey sta- tion .....	306
impulse voltage gener- ator .....	66	Itaipu HVDC trans- mission project .....	475	lightning withstanding level .....	321
indoor switchgear arrang- ment .....	446	Italian Lecco tower testing station .....	476	linear resonance overvolt- age .....	462
induced lightning over- voltage .....	175	<b>K</b>		line trap in convertor station .....	223
inductance coupling effects of transmission lines .....	391	KEMA high power laboratory .....	200	Liujiaxia - Guanzhong transmission line .....	312
inductance switching - off overvoltage .....	294	key substation .....	372	live line maintenance .....	375
inner insulation .....	323	klydonograph recorder ...	96	live-line washing in substation .....	12
inspection and survey of transmission line .....	404	<b>L</b>		live-line work in substa- tion .....	12
installation of overhead conductors and ground wires .....	257	lantern for roadway lighting .....	313	L.I.S. ....	306
instrument and control circuit of substation .....	13	lattice diagram method ...	445	load characteristics of distribution system ...	339
insulating cable joint .....	290	layout of convertor station .....	226	load curve of distribu- tion system .....	338
insulation co-ordina- tion .....	291	leader .....	451	load density of distribu- tion system .....	338
insulation coordination for DC transmission system .....	508	lighting in substation .....	30	load forecast of distribu- tion system .....	341
insulation design of trans- mission line .....	394	lightning .....	304	load rejection overvolt- age .....	427
insulation level .....	293	lightning arrester .....	4	load simultaneity factor of distribution system ...	341
insulation level of electrical equipment .....	130	lightning discharge process .....	309	load switch .....	156
insulation life test .....	292	lightning eliminator .....	466	long distance power transmission .....	480
insulation resistance measurement .....	290	lightning location system .....	306	low-oil-content circuit breaker .....	369
insulation tests of high voltage electric power equipment .....	181	lightning overvoltage .....	308	low voltage distribution network .....	95
insulator .....	293	lightning parameter .....	304	low voltage insulators of distribution lines .....	350
insulators of transmission line .....	397	lightning protection design of transmission line ...	389	low - voltage overhead distribution line .....	94
interference effects of trans- mission lines .....	389	lightning protection of distribution trans- former .....	330	<b>M</b>	
		lightning protection of electrical equipment ...	133	magnetic blowout circuit breaker .....	79
		lightning protection of rotating electric machine .....	472	magnetic field of trans-	
		lightning protection of substation .....	18		
		lightning protection of			





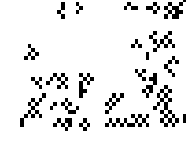
mission line .....	374	network high power		overvoltage due to poten-	
magnet - valve surge		testing station .....	445	tial transformer satur-	
arrester .....	78	neutral grounding practice		ation .....	136
main circuit diagram of		of distribution		overvoltage due to system	
convertor station .....	227	network .....	348	splitting .....	275
main discharge .....	531	neutral-point reactor .....	527	overvoltage in incomplete	
main electrical connection		noise in substation .....	30	phase operation .....	152
scheme .....	132	non-attended substa-		overvoltage modeling .....	196
main one-line diagram ...	132	tion .....	448	overvoltages in DC trans-	
making and breaking		north suburban 500 kV		mission system .....	503
tests .....	295	substation of Tianjin ...	434		
Manicouagan - Montreal				Pacific Intertie .....	432
transmission line .....	318	oil - filled cable installa-		package substation .....	463
mass - impregnated paper		tion .....	70	parallel operation of AC	
insulated cable .....	323	oil feeding equipments for		and DC transmis	
mass impregnated non-		oil-filled cable .....	71	sions .....	267
draining cable .....	60	oil impregnated paper		parameters for high	
mechanical calculations		insulated cable .....	479	power test .....	83
of overhead wire .....	250	operating characteristics		parametric resonance over-	
mechanical laboratory		of convertor .....	219	voltage .....	61
of transmission line ...	462	operating characteristics		partial discharge test .....	287
medium-arrangement of		of DC transmission		permanent elongation of	
outdoor switchgear ...	527	systems .....	516	overhead line .....	256
medium-voltage distribu-		operating mechanism of		permanent permissible cur-	
tion network .....	528	disconnecting switch ...	189	rent carrying capacity	
medium-voltage overhead		operation and maintenance		of line conductor .....	88
distribution line .....	527	of distribution line .....	352	Petersen's principle .....	4
metal oxide surge ar-		operation and mainten-		phase - model transforma-	
rester .....	276	ance of substation .....	30	tion .....	464
meteorological conditions		ordinary valve type surge		phase overturn .....	465
for transmission line		arrester .....	357	pilot cable .....	93
design .....	399	oscillating circuit high		Pingdingshan - Wuchang	
method using charac-		power testing		transmission line .....	356
teristic line .....	433	station .....	483	pipe - type cable .....	176
MI cable .....	323	outage rate due to light-		pipe - type gas compres-	
MIND cable .....	60	ning stroke .....	308	sion cable .....	176
MOA .....	276	outside insulation .....	445	pipe - type oil - filled	
mode of electric power		overhead distribution line		cable .....	175
supply .....	193	design and construc-		Pisi river valley 500 kV	
multi - terminal DC trans-		tion .....	237	substation of Canada ...	233
mission system .....	145	overhead ground wire ...	233	pole & tower design .....	168
multi-terminal DC trans-		overhead transmission		pole & tower erection ...	170
mission system		line .....	240	pole & tower foundation	
control .....	146	overvoltage .....	195	of transmission line ...	162
		overvoltage computa-		pole - mounted circuit	
natural load .....	535	tion .....	196	breaker .....	160



pole - mounted discon- necting switch .....	160	cables .....	87	ring bus configuration ...	147
pole - mounted trans- former .....	159	protective facilities against lightning for distribution lines .....	351	ring mains unit .....	201
poles & towers .....	160	protective gap .....	2	roadway lighting .....	316
pollution classes of trans- mission line .....	403	PST terminal .....	310	roadway lighting con- trol .....	315
pollution flashover .....	446			ruling span .....	85
pollution flashover in substation .....	28	Quebec - New England HVDC interconnection scheme .....	303	rural distribution system .....	324
pollution measurement in substation .....	26			saturated reactor .....	531
polyethylene insulated cable .....	288	radio interference of trans- mission lines .....	403	SC .....	436
polyvinyl chloride insu- lated cable .....	288	radio interference test of high voltage equip- ment .....	183	screened type cable .....	357
porcelain cross arm .....	77	reactive power compensa- tion & voltage regula- tion in transmission & distribution systems ...	426	secondary arc .....	361
post - type insulator .....	484	reactive power compensa- tion of distribution system .....	347	sectionalization of hydrau- lic system of oil - filled cable .....	72
potential transformer .....	135	reactive power compensa- tor in convertor station .....	226	sectionalized double - bus configuration .....	428
power cable .....	127	reactor .....	97	sectionalized single - bus configuration .....	86
power cable line .....	127	reactor protection .....	98	sectionalized single - bus with auxiliary bus con- figuration .....	86
power distribution net- work .....	331	reactor tests .....	98	sectionulized double-bus with auxiliary bus con- figuration .....	428
power frequency over- voltage .....	192	regional substation .....	362	seismic stability of elec- tric equipment .....	131
power frequency with- stand voltage .....	193	relay protection in substa- tion .....	22	selection of busbar .....	319
power reverse .....	63	relay protection of DC transmission system ...	506	selection of cables in sub- station .....	12
power supply of instru- mentation and control in substation .....	16	reliability of overhead transmission line .....	244	selection of cable type and size .....	119
power supply of roadway lighting .....	314	reliability of substation bus arrangement .....	31	selection of conductor crosssection of trans- mission line .....	379
power transformer .....	123	resistance coupling effects of transmission lines ...	406	selection of current limit- ing reactor .....	451
power transmission and distribution .....	407	resonance effects in series compensation system ...	73	selection of disconnecting switch .....	189
premould cable termi- nal .....	479	resonance overvoltage ...	466	selection of enclosed bus bar .....	363
prestretched tube ter- minal .....	310	resonance overvoltage due to broken lines .....	144	selection of equipments in substation .....	24
primary circuit auxiliaries of shunt capacitor bank .....	58			selection of flexible bus bar .....	365
principle of equivalent wave .....	94				
protection of sheath over- voltages in single core					

selection of hard bus bar ..... 478	shunt compensators ..... 46	insulation co-ordi- nation ..... 292
selection of main trans- former ..... 530	shunted coefficient of lightning current ..... 154	steepness meter ..... 139
self - contained oil - filled cable ..... 535	shunt reactor control equipment ..... 53	step potential-differ- ence ..... 301
semi - high arrangement of outdoor switchgear ... 2	shunt reactor operation and maintenance ..... 54	step-up transformer ..... 369
separate lead sheathed cable ..... 154	shunt reactor relay protection ..... 52	step voltage ..... 301
series compensating device ..... 74	shunt reactors ..... 51	stop joint ..... 367
series compensating device operation and mainte- nance ..... 76	shunt reactors tests ..... 53	storage battery ..... 468
series compensating device protection ..... 75	SIL ..... 535	straight joint ..... 525
series compensating device tests ..... 76	simplified statistical method for insulation co-ordination ..... 291	structure spotting for transmission line ..... 388
service mains and service tails ..... 274	single - bus configur- ation ..... 86	submarine cable ..... 198
SF <sub>6</sub> gas circuit breaker ... 312	single post type discon- necting switch ..... 87	submarine cable laying ..... 198
SF <sub>6</sub> - insulated trans- former ..... 313	site of substation ..... 25	sub - span oscillation of conductors ..... 88
Shanghai Zhabei - Yang- shupu cable project ... 368	smoothing reactor ..... 356	substation ..... 9
shielding of high voltage laboratory ..... 179	soft joint ..... 113	substation fittings ..... 7
Shin - shinano HVDC frequency converting station ..... 467	solid extruded polymeric insulated cable ..... 194	substation layout ..... 11
short - circuit generator in high power testing station ..... 68	southwest Frankfurt 420 kV substation of Germany ..... 93	superconducting cable ..... 62
shunt capacitor bank complex ..... 56	sparkover protective device ..... 233	supporting structures of transmission line ..... 160
shunt capacitor bank con- nection ..... 57	specific creepage dis- tance ..... 327	surge absorbed capacitor in convertor station ... 222
shunt capacitor bank con- trol devices ..... 58	split - low - voltage wind- ings transformer ..... 152	surge arrester ..... 4
shunt capacitor bank oper- ation and mainten- ance ..... 59	SR ..... 531	surge arrester tests ..... 4
shunt capacitor bank relay protection ..... 56	start and stop of DC trans- mission system ..... 512	surge impedance ..... 60
shunt capacitor ..... 54	static compensator relay protection ..... 284	surge impedance load ..... 535
shunt capacitor tests ..... 56	static compensator oper- ation and mainten- ance ..... 286	surge velocity ..... 60
	static compensator tests ..... 285	survey and exploration for overhead transmis- sion line design ..... 245
	static var compen- sator ..... 282	suspension - type insu- lator ..... 471
	static var generator ..... 286	SVC ..... 282
	statistical method for	SVG ..... 286
		switchgear arrang- ment ..... 353
		switchgear panel ..... 297
		switchgear panels with switching devices on truck ..... 371
		switching facilities in con- vertor station ..... 225
		switching impulse insu- lation level ..... 61

switching overvoltage .....	62	testing transformer .....	370	transformer cooling .....	40
switching station .....	298	test line .....	371	transformer fault .....	38
switchyard .....	447	tests after installation of		transformer installation ...	35
synchronous conden-		cable line .....	116	transformer maintenance	
ser .....	436	tests of disconnecting		and overhaul .....	43
synchronous condenser		switch .....	189	transformer oil .....	43
excitation .....	438	tests of switchgear		transformer operation .....	45
synchronous condenser		panel .....	297	transformer protection ...	37
failures .....	437	tests of transmission		transformer tests .....	41
synchronous condenser		line conductors .....	452	transformer transporta-	
maintenance and over-		tests of transmission		tion .....	44
haul .....	438	line fittings .....	458	transition cable joint .....	197
synchronous condenser		tests of transmission		transmission line cross-	
operation and con-		line towers .....	456	sings .....	394
trol .....	412	tests with direct volt-		transmission line	
synchronous condenser		age .....	486	faults .....	391
relay protection .....	438	tests with impulse volt-		transmission line insula-	
synchronous condenser		age .....	67	tion level .....	459
starting methods .....	440	tgδ measurement .....	276	transmission line mechan-	
synchronous condenser		three-post type discon-		ical research facility of	
tests .....	441	necting switch .....	368	America EPRI .....	318
system tests of DC trans-		thunder-storm cloud .....	309	transmission line main-	
mission project .....	493	thyristor controlled react-		tenance .....	402
<b>T</b>		or .....	280	transmission line passage	
TCR .....	280	thyristor controlled trans-		way .....	400
TCT .....	280	former .....	280	transmission line rout-	
technical & economical in-		thyristor switched capac-		ing .....	398
dexes of substations .....	22	itor .....	281	transmission line tower	
technical & economical in-		Tokyo Power Company		testing station of Elec-	
dexes of transmission		500 kV substation of		tric Power Construc-	
line .....	393	Japan .....	364	tion Research Institute	
technical standard for		tools & machines for cons-		of China .....	526
power transmission		truction of pole & tower		transmission network .....	373
& distribution .....	412	foundations .....	167	traveling wave .....	467
technology & economy		tools & machines for		TSC .....	281
of power transmission		erection of pole &		tube type surge ar-	
& distribution .....	419	tower .....	172	rester .....	195
tee joint .....	155	tools and machines for		types of DC return	
telecommunications for		installation of overhead		circuit .....	232
DC transmission .....	520	conductors .....	261	<b>U</b>	
telecontrol equipments in		touch potential-differ-		unclosed switchgear	
substation .....	28	ence .....	267	panel .....	62
temporal overvoltage .....	182	touch voltage .....	267	unclosed type composite	
tension equation of over-		tower foundation tests		apparatus .....	62
head wire .....	257	of transmission line ...	455	underground cable distri-	
terminal substation .....	529	transfer capacity of		bution network .....	111
		power transmission ...	372		

underground substa- tion .....	96	but ion system .....	334	submarine cable project .....	450
United Kingdom-France cross channel HVDC transmission project ...	477	voltage levels of power transmission and dis- tribution .....	411		
upward lightning .....	368	voltage regulation of dis- tribution system .....	334	Yuanbaoshan - Jinzhou - Liaoyang transmission line .....	480
		voltage regulator of trans- former .....	41		
vacuum circuit breaker ...	482	V type disconnecting switch .....	444	Zhoushan HVDC trans- mission project .....	529
vacuum contactor .....	483				
valve hall .....	150	wave attenuation .....	59	4/3 circuit breaker con- figuration .....	367
valve type surge ar- rester .....	149	wave distortion .....	59		
Volgogradskaja - Moscow transmission line .....	156	wet test .....	370		
voltage distribution test .....	134				
voltage levels of distri- bution system .....	334	Xiamen Jimei - Gaoqi			

内 容 索 引

说 明

一、本索引是全卷条目和条目内容的主题分析索引。索引主题按汉语拼音字母的顺序并辅以汉字笔画、起笔笔形顺序排列。同音时，按汉字笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、㇏（折，包括乚（等）的顺序排列。第一字相同时，按第二字，余类推。罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的主题，依次排在汉字索引主题的后面。

二、设有条目的主题用黑体字，未设条目的主题用仿宋体字。 a d

三、索引中人名一般附有人物的生卒年或活动年代，外国人名还附有原文姓和名（或名的缩写字母）。 b e

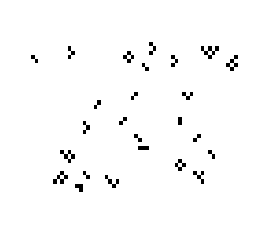
四、索引主题之后的阿拉伯数字是主题内容所在的页码，数字之后的小写拉丁字母表示索引内容所在的版面区域。本书正文的版面区域划分如右图。 c f

阿尔尼合金粉	79f	压器)	153a	1975)	304e,307f
阿历克山大罗夫,Г. Н.		半地下式配电变电所	328c	贝内特(Bennett 1931)	127e
(Г. Н. Александров		半封闭式开关柜	62d	贝热龙法	3c
1970)	277e	半峰时间(冲击波形)	66b	贝热龙,L. (L. Bergeron	
埃基巴斯图兹—车里雅宾		半高型屋外配电装置	2a	1928)	433c
斯克输电线路	1a	半塞止接头(电力电缆)	176a	背靠背直流耦合系统	3c
埃基巴斯图兹—苏联欧洲		半屋内式配电变电所	328b	比弗,C. J. (C. J. Beaver	
部分中心直流输电工程	1d	半自动准同步装置	15e	1933)	70d,127e
埃曼努埃利,L. (L.		绑扎牵引	122c	比换相压降	211a,231b
Emanueli 1917)	127e	棒间隙	177b	比较仪表	130d
爱迪生,T. A. (Thomas		棒形绝缘子	395d	彼德逊法则	4b
Alva Edison 1847		棒形悬式绝缘子	471f	彼得森,W. (W. Petersen	
~1931)	128a	棒形支柱绝缘子	484a	1916)	465d
安德森,J. G. (J. G.		饱和电抗器	69c	彼得森线圈	465d
Anderson)	305d	保持荷载法(杆塔基础		避雷器	4d
安德森,R. B. (R. B.		试验)	455e	避雷器试验	4f
Anderson 1973)	307f	保护间隙	2d	避雷线	5c
安全接地	268e	保护角(避雷线)	454a	避雷针	6e
按相控制	213a	保护接地	179b,268e	边缘熔断器	187e
		保护金具	243a	编码选线	14d
		保护罩(电缆接头)	525f	变电金具	7c
		爆扩桩基础	163f	变电容载比	347b
		北京电缆隧道工程	2e	变电所	9f
		贝格尔,K. (K. Berger		变电所布置	11a

变电所带电水冲洗 .....	12b	变压器故障 .....	38d	Popolansky) .....	305d
变电所带电作业 .....	12e	变压器接线组别 .....	39b	波反射 .....	468a
变电所道路照明 .....	31f	变压器冷却 .....	40b	波峰时间(操作冲击波形) ...	66c
变电所电磁与环境影响 .....	12f	变压器试验 .....	41a	波前时间(冲击波形) .....	66b
变电所电缆选择 .....	12f	变压器调压装置 .....	41d	波前时间常数 .....	66f
变电所二次回路 .....	13d	变压器维护检修 .....	43d	波衰减 .....	59f
变电所二次回路电源 .....	16d	变压器油 .....	43f	波速 .....	60a
变电所防火与防爆 .....	18c	变压器运输 .....	44d	波尾时间常数 .....	66f
变电所防雷 .....	18f	变压器运行 .....	45a	波纹式油箱 .....	125f
变电所防污涂剂 .....	20e	变压器运行效率 .....	46a	波依斯相机 .....	180e
变电所防污型绝缘子 .....	21b	标称储能(冲击电压发		波折射 .....	468a
变电所辅助设施 .....	21b	生器) .....	66f	波阻 .....	60c
变电所工频电场 .....	109f	标称电压(冲击电压发		波阻抗 .....	60b
变电所技术经济指标 .....	22a	生器) .....	66f	玻璃绝缘子 .....	293d
变电所继电保护 .....	22f	标准操作冲击 .....	67c	箔电极并联电容器 .....	55a
变电所接地装置 .....	23b	标准操作冲击波形 .....	66c	箔式线圈 .....	124f
变电所内运动形式 .....	16d	标准冲击电流波形 .....	65d	补偿法 .....	60d
变电所设备选择 .....	24a	标准档距 .....	238c	捕捉同步装置 .....	15e
变电所所址 .....	25d	标准雷电冲击 .....	67c	不触发(晶闸管阀) .....	217b
变电所通信 .....	26b	标准雷电冲击波形 .....	66c	不滴流电缆 .....	60d
变电所微机监测 .....	15f	标准雷电冲击截波 .....	67c	不对称系数(变压器中	
变电所污秽测定 .....	26d	标准气象条件 .....	460c	性点) .....	463a
变电所污秽分级 .....	27b	标准塔高 .....	238c	不开通(晶闸管阀) .....	217b
变电所污秽闪络 .....	28b	并联补偿度 .....	481b	不平衡绝缘法(线路	
变电所远动装置 .....	28d	并联补偿装置 .....	46c	防雷) .....	455a
变电所运行维护 .....	30a	并联电抗器 .....	51a	布朗,G. W. (G. W. Brown) ...	6a
变电所噪声 .....	30e	并联电抗器继电保护 .....	52e	布雷特尔特型防振器 .....	255f
变电所照明 .....	30f	并联电抗器控制装置 .....	53a		
变电所主接线可靠性 .....	31f	并联电抗器试验 .....	53e		
变电所主控制楼 .....	32f	并联电抗器运行检修 .....	54b		
变电所自动化 .....	33d	并联电容器 .....	54f		
变电所自用电 .....	33f	并联电容器试验 .....	56b		
变换器式仪表 .....	266d	并联电容器组成套装置 .....	56d		
变频启动(同步调相机) .....	440f	并联电容器组继电保护 .....	56f		
变频站 .....	3d	并联电容器组接线 .....	57c		
变像管 .....	35b	并联电容器组控制装置 .....	58c		
变像仪 .....	35b	并联电容器组一次配套			
变压器 .....	123c	设备 .....	58f		
变压器安装 .....	35f	并联电容器组运行维护 .....	59c		
变压器保护 .....	37c	并联开断 .....	144c		
变压器并列运行 .....	46a	并联开断试验 .....	296c		
变压器电缆终端 .....	465b	波变形 .....	59e		
变压器分接开关 .....	41f	波波兰斯基,F. (F.			

操作电动机试验 ..... 297b  
**操作过电压** ..... 62a  
操作过电压倍数 ..... 62b  
操作过电压系数 ..... 62b  
测量球隙 ..... 177a  
插花纠结式线圈 ..... 125a  
产气式负荷开关 ..... 157b  
长时(1~2 h)工频耐受  
    电压 ..... 193a  
长时间工频试验 ..... 265b  
常充气式空气断路器 ..... 299b  
厂制接头(电力电缆) ..... 113d  
**敞开式开关柜** ..... 62d  
敞开式六氟化硫断路器 ..... 313b  
**敞开式组合电器** ..... 62d  
**超导电缆** ..... 62f  
超低频电压试验 ..... 265d  
**潮流反转** ..... 63c  
城市电力网 ..... 63f  
**城市配电网** ..... 63f  
城市屏蔽系数(电力  
    电缆) ..... 112e  
城网 ..... 64a  
持续运行电压(避雷器) ..... 276f  
**冲击电流发生器** ..... 65b  
**冲击电压发生器** ..... 66a  
**冲击电压试验** ..... 67b  
冲击动荷试验(线路  
    金具) ..... 459a  
冲击分压器 ..... 177f  
冲击峰值电压表 ..... 178a  
冲击接地电阻 ..... 68c, 270c  
**冲击接地阻抗** ..... 68c  
冲击示波器 ..... 178a  
冲击同步发电机 ..... 68d  
冲击同步发电机回路试验 ... 84b  
**冲击同步发电机试验站** ..... 68d  
冲击系数(冲击接地  
    电阻) ..... 270e  
充电-放电运行方式(蓄  
    电池) ..... 469c  
**充电装置** ..... 69a  
**充气电缆** ..... 70b

充气套管 ..... 433a  
**充油电缆安装** ..... 70e  
**充油电缆供油装置** ..... 71d  
**充油电缆油路分段** ..... 72d  
充油电缆 SF<sub>6</sub> 终端 ..... 360f  
充油套管 ..... 433a  
重合熔丝 ..... 351e  
抽样试验 ..... 182e  
出厂试验 ..... 182e  
出线端短路故障试验 ..... 295e  
初勘(输电线路) ..... 245b  
初伸长(架空线) ..... 256c  
储油设施 ..... 22a  
触发角 ..... 210d  
触发角控制 ..... 511d  
穿墙式电流互感器 ..... 128d  
穿越阻抗(分裂变压器) ..... 153a  
串级试验变压器 ..... 370f  
串级直流高压发生器 ..... 488e  
串联补偿的强行补偿 ..... 481a  
串联补偿度 ..... 480e  
**串联补偿系统谐振** ..... 73a  
**串联补偿装置** ..... 74a  
**串联补偿装置保护** ..... 75d  
**串联补偿装置试验** ..... 76b  
**串联补偿装置运行检修** ..... 76f  
串联电抗器 ..... 451b  
串联电容补偿 ..... 335d, 480e  
串联电容补偿装置 ..... 74a  
串联调压变压器 ..... 335c  
串联线圈(自耦变压器) ..... 534d  
串联谐振试验装置 ..... 180b  
垂直式连续硫化 ..... 264a  
纯瓷套管 ..... 432f  
纯交流互联 ..... 421b  
纯膜介质并联电容器 ..... 55c  
纯直流互联 ..... 421b  
纯纸介质并联电容器 ..... 55b  
瓷管 ..... 350c  
**瓷横担** ..... 77c  
瓷夹板 ..... 350c  
瓷绝缘子 ..... 293d  
瓷瓶充气式空气断路器 ..... 299b

**磁吹避雷器** ..... 78d  
**磁吹断路器** ..... 79b  
磁吹阀式避雷器 ..... 149f  
磁带数据记录仪 ..... 322c  
磁电系统流比计 ..... 525d  
磁动态振动(铁芯) ..... 330b  
磁放大器 ..... 69f  
**磁钢棒** ..... 79f  
磁聚焦变像管 ..... 35b  
磁屏蔽(电力电缆) ..... 102e  
磁影响(输电线路) ..... 391b  
磁致伸缩振动(铁芯) ..... 330a  
次档距 ..... 244a  
次输电电压 ..... 331f  
次输电线路 ..... 349d  
次同步共振 ..... 73c  
次谐波谐振 ..... 73a  
  
打入桩基础 ..... 163e  
大地电流影响(输电  
    线路) ..... 406d  
大地回流方式 ..... 232a  
**大电流断路器** ..... 81a  
**大功率实验站** ..... 81c  
**大功率试验** ..... 82a  
**大功率试验参数** ..... 83a  
**大功率试验方法** ..... 84a  
**大古力 525 kV 电缆工程** ..... 85c  
大气过电压 ..... 195e  
**代表档距** ..... 85e  
带电水冲洗 ..... 376e  
带绝缘层(电力电缆) ..... 85f  
**带绝缘电缆** ..... 85f  
单耗法(负荷预测) ..... 341e  
单极系统 ..... 492d  
单极直流输电系统 ..... 492d  
单极直流线路 ..... 492d  
**单母线分段带旁路母线**  
    接线 ..... 86b  
**单母线分段接线** ..... 86d  
**单母线接线** ..... 86f  
单桥换流站 ..... 221d

单调谐滤波器 ..... 224d,282b

单相颠覆 ..... 216d

单芯电缆护层过电压保护 ... 87a

单柱式隔离开关 ..... 87f

单柱型杆塔 ..... 161f

档距 ..... 251a

档距利用系数 ..... 394a

导轨式风动凿岩机 ..... 168a

导体屏蔽(电力电缆) ..... 102e

导体压接机具 ..... 100a

导线长期允许电流 ..... 88b

导线次档距振荡 ..... 88b

导线覆冰舞动 ..... 88f

导线弧垂曲线 ..... 238d

导线间隔棒 ..... 9e

导线经济电流密度 ..... 92c

导线拉断力 ..... 452b

导线平均运行应力 ..... 254f

导线弹性系数 ..... 452b

导线脱冰跳跃 ..... 92d

导线压接机 ..... 261f

导线阻尼率 ..... 463a

导引电缆 ..... 93a

倒落式抱杆整立杆塔 ..... 170f

倒装组塔 ..... 172c

德国法兰克福 420 kV 西南  
    变电所 ..... 93c

    等触发角控制 ..... 213a

    等电位作业法(带电  
        作业) ..... 375f

    等光强曲线 ..... 314d

    等价距离(直流与交流  
        输电) ..... 519f

    等间隔控制 ..... 213b

    等距离脉冲控制 ..... 213b

    等相位间隔控制 ..... 213b

等值波法则 ..... 94b

等值附盐密度 ..... 364f

等值集中参数定理(行波  
    计算) ..... 4b

邓哈陀,J. P. (J. P. Den  
    Hartog 1932)..... 89b

邓哈陀机理(导线舞动) ..... 89b

邓希思(Dunsheath 1914) ... 127e

低温有阻电缆 ..... 94d

低型屋外配电装置 ..... 448a

低压布线层绝缘子 ..... 350c

低压架空配电线路 ..... 94f

低压绝缘子 ..... 293e

低压脉冲反射法(电缆故障  
    测寻) ..... 109c

低压配电电压 ..... 331f

低压配电网 ..... 95e

低烟无卤阻燃电缆 ..... 103f

低盐酸高阻燃电缆 ..... 103f

低阻尼分压器 ..... 178a

迪维茨,P. (P. Divisch  
    1754) ..... 466e

底板式基础 ..... 163a

底卡拉线盘基础 ..... 164b

地电位法(带电作业) ..... 375d

地电位影响(输电线路)..... 406d

地调 ..... 335f

地面落雷密度 ..... 304c

地区变电所 ..... 96a

地下变电所 ..... 96c

地下式配电变电所 ..... 328b

第三绕组(自耦变压器)..... 534d

点网式配电网 ..... 345f

电报回路干扰电流 ..... 390c

电磁式电压互感器 ..... 135c

电磁锁 ..... 185a

电动发电机组 ..... 69a

电动滚轮牵引 ..... 122d

电动系流比计 ..... 266c

电花图 ..... 96f

电花仪 ..... 96e

电话回路杂音电动势 ..... 390b

电抗器 ..... 97a

电抗器保护 ..... 98a

电抗器降压启动 ..... 440b

电抗器试验 ..... 98d

电缆安装 ..... 99a

电缆安装机具 ..... 99e

电缆层数设 ..... 100c

电缆导体连接 ..... 100e

电缆电场应力 ..... 101c

电缆电磁场 ..... 102b

电缆电磁屏蔽 ..... 102d

电缆防火 ..... 103c

电缆防火槽 ..... 104c

电缆防火带 ..... 104d

电缆分支箱 ..... 104d

电缆敷设机具 ..... 99e

电缆敷设计算 ..... 104f

电缆供油装置允许供油  
    压力计算 ..... 107a

电缆沟敷设 ..... 108b

电缆故障 ..... 108d

电缆故障测寻 ..... 108f

电缆故障修理 ..... 110c

电缆滚轮 ..... 99f

电缆护层保护器 ..... 87c

电缆换位 ..... 103b

电缆接头 ..... 110f

电缆接头机具 ..... 100a

电缆排管敷设 ..... 111b

电缆盘千斤顶 ..... 99f

电缆配电网 ..... 111e

电缆配电线路 ..... 349e

电缆屏蔽系数 ..... 112b

电缆牵引端 ..... 113a

电缆软接头 ..... 113c

电缆蛇形敷设 ..... 113f

电缆式电流互感器 ..... 128e

电缆竖井敷设 ..... 114c

电缆隧道 ..... 114e

电缆隧道敷设 ..... 114e

电缆土沟 ..... 121e

电缆线路电气参数 ..... 115a

电缆线路技术资料 ..... 115f

电缆线路交接试验 ..... 116b

电缆线路控制电缆 ..... 117a

电缆线路路径选择 ..... 117b

电缆线路设计 ..... 118a

电缆线路外力破坏防护 ..... 118f

电缆线路巡视检查 ..... 119b

电缆线路运行维护 ..... 119d

电缆选型 ..... 119f



**电缆应力锥** ..... 120d  
 电缆油泵站 ..... 72c  
**电缆预防性试验** ..... 121b  
**电缆直埋敷设** ..... 121d  
**电缆终端** ..... 122f  
**电力变压器** ..... 123c  
**电力电缆** ..... 127b  
 电力电缆屏蔽系数 ..... 112c  
**电力电缆线路** ..... 127f  
 电力负荷年持续曲线 ..... 339c  
 电力弹性系数 ..... 342a  
 电量预测法(负荷预测) ..... 341e  
**电流互感器** ..... 128c  
 电流引入法合成回路 ..... 84d  
 电流源型静止无功发  
     生器 ..... 287b  
 电流转换矩阵 ..... 464c  
 电炉电抗器 ..... 97f  
 电能表 ..... 130c,266b  
 电能损耗率 ..... 333e  
 电屏蔽(电力电缆) ..... 102e  
**电气测量仪表** ..... 129d  
 电气设备检修同 ..... 21c  
**电气设备绝缘水平** ..... 130e  
**电气设备抗震** ..... 131b  
**电气主接线** ..... 132d  
**电气装置防雷** ..... 133e  
 电桥法(电缆故障测寻) ..... 109a  
 电容储能电源 ..... 18a  
**电容传递过电压** ..... 134a  
 电容分压器 ..... 322e  
 电容器负荷 ..... 157a  
 电容式电压互感器 ..... 135f  
 电容式套管 ..... 433b  
 电容效应(工频过电压) ..... 192b  
 电寿命试验 ..... 297b  
 电树枝 ..... 264b  
 电网换相 ..... 231a  
 电压波动 ..... 46e  
**电压分布试验** ..... 134f  
**电压互感器** ..... 135b  
**电压互感器饱和过电压** ..... 136e  
 电压零点 ..... 209d

电压偏差 ..... 334f  
 电压偏差标准 ..... 334f  
 电压闪变 ..... 46f  
 电压引入法合成回路 ..... 85c  
 电压源型静止无功发  
     生器 ..... 286e  
 电压转换矩阵 ..... 464c  
 电影响(输电线路) ..... 399b  
 电晕干扰 ..... 387f  
 电晕起始电压 ..... 138a,387b  
**电晕试验** ..... 137d  
**电晕试验笼** ..... 138b  
 电晕损耗 ..... 387c  
 电晕损失试验 ..... 137d  
 电晕熄灭电压 ..... 138a  
 电晕噪声 ..... 388a  
 电子式电压互感器 ..... 136e  
 电子仪表 ..... 130a  
 电阻分压器 ..... 322e  
 电阻器 ..... 177d  
 调度自动化 ..... 336d  
 调度自动化系统 ..... 354f  
**跌落式熔断器** ..... 138d  
 叠加电压试验 ..... 158a  
 蝶式绝缘子 ..... 350c  
 定触发角控制 ..... 511d  
 定电流控制 ..... 511c  
 定功率控制 ..... 511d  
 定减额电流控制 ..... 511f  
 定位曲面(避雷线绕击) ..... 6b  
 定向仪(雷电观测) ..... 306f  
 动态无功补偿装置 ..... 48b  
 动稳定电流 ..... 84a  
 动稳定试验 ..... 82d  
 陡波前冲击试验 ..... 68b  
**陡度仪** ..... 139b  
 镀锌层试验(线路金具) ..... 459e  
 镀锌铝绞线 ..... 250a  
 端电池调整器 ..... 469d  
 端头牵引(电缆敷设) ..... 122a  
 短路变压器 ..... 446a  
 短时(1 min)工频耐受  
     电压 ..... 193a

短时耐受电流 ..... 84a  
 短时耐受电流试验 ..... 82c  
**断路器** ..... 139c  
**断路器操动机构** ..... 140d  
 断路器可靠性 ..... 32c  
**断路器失灵保护** ..... 142b  
**断路器试验** ..... 142e  
**断路器选择** ..... 143c  
**断线谐振过电压** ..... 144f  
 对称分量变换 ..... 464d  
 多重放电(雷电) ..... 306a  
**多端直流输电系统** ..... 145b  
**多端直流输电系统控制** ..... 146b  
 多端直流与直流电网 ..... 422a  
 多回线式配电网 ..... 345a  
 多级法(冲击电压试验) ..... 67d  
 多间隙截波装置 ..... 275e  
**多角形接线** ..... 147b  
 多桥换流器 ..... 212c  
 多阳极汞弧阀 ..... 205f  
**多油断路器** ..... 147d  
  
 额定冲击耐受电压试验 ..... 67f  
 额定短路开断电流 ..... 83a  
 额定工频耐受电压试验 ..... 265b  
 二次开断 ..... 295e  
 二次配电电压 ..... 331f  
 二次配电线路 ..... 94f  
  
 发电机断路器 ..... 81a  
 发展性故障 ..... 296c  
 发展性故障开断试验 ..... 296c  
**阀电流断点检测装置** ..... 149a  
 阀片 ..... 4e  
**阀式避雷器** ..... 149d  
 阀体保护 ..... 508a  
**阀厅** ..... 150d  
 阀厅空调系统 ..... 223c  
**法国电力公司高压实  
     验室** ..... 151a  
**繁昌 500 kV 变电所** ..... 151d  
**反变换过电压** ..... 152a,331b

反击 ..... 152a

反射波 ..... 468a

反射系数 ..... 468b

反行波 ..... 467f

反行混合波 ..... 433d

反作用力塔 ..... 457c

防冰雪导线 ..... 249d

防火墙 ..... 104b

防火涂料 ..... 104a

防静电接地 ..... 268e

防雷变压器 ..... 472f

防雷分析仪 ..... 196f

防雷接地 ..... 268e

防捻器 ..... 99f

防舞动金具 ..... 244c

防舞动片 ..... 91e

防振锤 ..... 243b

防振跳线 ..... 255f

放电电荷(雷电) ..... 306a

放电率(冲击电压试验) ..... 67d

放射式配电网 ..... 344f

放线滑车 ..... 262a

飞车 ..... 262c

非换相期间 ..... 230f

非全相运行过电压 ..... 152c

非特征谐波 ..... 515c

非同步互联 ..... 421a

非同步联络站 ..... 3d

非有效接地 ..... 348c

非直配电视 ..... 472f

非自恢复绝缘 ..... 182d

费兰蒂,S. Z. (Sebastian Ziani de Ferranti 1864~1930) ..... 128a,479c

分解组塔 ..... 171d

分量系数(配电网负荷) ..... 341a

分裂变压器 ..... 152f

分裂导线 ..... 153b

分裂电抗器 ..... 451b,451f

分裂绕组 ..... 152f

分裂式油箱 ..... 125f

分裂系数(分裂变压器) ..... 153a

分裂阻抗(分裂变压器) ..... 153a

分流系数 ..... 154d

分频谐振 ..... 435e

分铅型电缆 ..... 154f

分散系数(配电网负荷) ..... 341a

分相接地作业法(带电作业) ..... 376c

分相控制 ..... 213a

分压比 ..... 177e

分压器 ..... 177e,322e

分闸充气式空气断路器 ..... 299b

分支电缆接头 ..... 155b

丰满—李石寨输电线路 ..... 155d

风动凿岩机 ..... 168a

风阻尼器 ..... 90f

封闭式开关柜 ..... 155f

封堵泥 ..... 104b

峰值耐受电流 ..... 83f

峰值耐受电流试验 ..... 82d

锋面雷云 ..... 309a

伏尔加格勒—莫斯科输电线路 ..... 156b

伏-秒特性试验 ..... 68a

浮充电运行方式(蓄电池) ..... 469e

辐向应力(电力电缆) ..... 101d

辅助电缆 ..... 156d

负荷补偿 ..... 46e

负荷开关 ..... 156f

负荷密度法(负荷预测) ..... 342a

负极半站 ..... 221e

负上行雷 ..... 368f

附加旁路跳线架换位 ..... 378e

附加影响效应(分裂导线) ..... 366a

复合避雷器 ..... 157c

复合电压试验 ..... 157e

复式整流电源 ..... 17d

富兰克林,B. (Benjamin Franklin 1706~1790) ..... 7b

干法交联 ..... 263e

干耐受试验 ..... 159d

干闪络试验 ..... 159d

干式变压器 ..... 159a

干式并联电抗器 ..... 51c

干试验 ..... 159d

干字型塔 ..... 161d

杆变 ..... 159e

杆上变压器 ..... 159e

杆上断路器 ..... 160b

杆上负荷开关 ..... 160b

杆上隔离开关 ..... 160c

杆塔 ..... 160f

杆塔基础 ..... 162f

杆塔基础设计 ..... 164e

杆塔基础施工 ..... 166a

杆塔基础施工机具 ..... 167c

杆塔挠曲 ..... 404e

杆塔倾斜 ..... 404e

杆塔设计 ..... 168c

杆塔组立 ..... 170e

杆塔组立施工机具 ..... 172f

感应电动机自励磁 ..... 73c

感应雷过电压 ..... 175a

感应型调压器 ..... 335c

刚性间隔棒 ..... 244a

钢格栅基础 ..... 163d

钢管充油电缆 ..... 175e

钢管电缆 ..... 176c

钢管压气电缆 ..... 176e

钢芯铝包钢绞线 ..... 249a

钢芯铝合金绞线 ..... 248f

钢芯铝绞线 ..... 248e

高电压测量装置 ..... 177a

高电压强电流实验站 ..... 81c

高电压实验室 ..... 178c

高电压实验室接地 ..... 179a

高电压实验室屏蔽 ..... 179f

高电压试验厅 ..... 178e

高电压谐振试验装置 ..... 180b

高频谐振 ..... 201b

高频谐振 ..... 435e

高速摄影机 ..... 180e

高通滤波器 ..... 224e,282b


高型屋外配电装置 ..... 181c

高压电力设备绝缘试验 ..... 181f  
 高压电器无线电干扰  
     试验 ..... 183b  
 高压硅堆 ..... 488f  
 高压架空配电线路 ..... 183e  
 高压绝缘子 ..... 293e  
 高压开关设备 ..... 82b  
 高压开关设备联锁装置 ..... 184e  
 高压配电电压 ..... 331f  
 高压配电网 ..... 185c  
 高压熔断器 ..... 185f  
 高压直流线路保护 ..... 508b  
 高自然功率线路 ..... 277c, 422c  
 高阻计 ..... 291a  
 高阻抗接地 ..... 348c  
 高阻尼分压器 ..... 178a  
 戈尔德, R. H. (R. H. Golde 1970) ..... 466e  
 戈列夫, A. A. (A. A. Горев 1940) ..... 483d  
 哥得兰直流输电工程 ..... 186b  
 格式网络 ..... 186e  
 格网式配电网 ..... 186d, 345e  
 葛洲坝—上海直流输电  
     工程 ..... 190d  
 隔离开关 ..... 188c  
 隔离开关操动机构 ..... 189a  
 隔离开关试验 ..... 189d  
 隔离开关选择 ..... 189f  
 隔音墙 ..... 330c  
 巨长(输电线路) ..... 393f  
 工频电压升高系数 ..... 62b  
 工频过电压 ..... 192a  
 工频耐受电压 ..... 193a, 131a  
 工频熄弧 ..... 201a  
 工频谐振 ..... 435e  
 工业性试验线路 ..... 179a  
 工作接地 ..... 179b, 268e  
 公共线圈(自耦变压器) ..... 534d  
 功率倍增型静上无功  
     发生器 ..... 287b  
 功率因数表 ..... 266b  
 功率因数补偿 ..... 426f

功能性灯具 ..... 313f  
 供电方式 ..... 193e  
 供电器 ..... 17d  
 供电网 ..... 64a  
 供电系统 ..... 64a  
 供油电缆接头 ..... 72e  
 汞弧阀 ..... 205f  
 鼓轮型扫描式高速摄影机 ..... 180e  
 鼓形绝缘子 ..... 350c  
 固定金具 ..... 9a  
 固定式带电水冲洗 ..... 12d  
 固式绝缘电缆 ..... 323e  
 固体挤压聚合电缆 ..... 194d  
 固体挤压聚合电缆 SF<sub>6</sub>  
     终端 ..... 361a  
 固体污层法(污秽试验) ..... 364e  
 故障录波仪 ..... 322d  
 故障率(架空输电线路) ..... 245a  
 故障自行烧清(电缆) ..... 187c  
 关断角 ..... 211f  
 关断角控制 ..... 511d  
 关断时间 ..... 278c  
 关合能力试验 ..... 82b  
 管式避雷器 ..... 195b  
 管式油箱 ..... 125f  
 惯用法冲击耐压试验 ..... 68a  
 罐式并联电容器 ..... 55c  
 罐式空气断路器 ..... 299c  
 光触发晶闸管 ..... 206c  
 光电式电压互感器 ..... 136c  
 光缆复合架空地线 ..... 240d  
 光纤组合导线 ..... 249f  
 光线记录示波器 ..... 321f  
 光学诱导(道路照明) ..... 317e  
 硅烷交联 ..... 263f  
 硅油 ..... 20f  
 硅整流器 ..... 69b  
 硅脂 ..... 21a  
 过补偿(消弧线圈) ..... 465f  
 过电压 ..... 195e  
 过电压幅值记录仪 ..... 322b  
 过电压计算 ..... 196d

过电压记录仪 ..... 321f  
 过电压模拟 ..... 196f  
 过渡电缆接头 ..... 197a  
 H  
 H 型电缆 ..... 357e  
 哈尔什龙厄—海尔辛堡  
     输电线路 ..... 198a  
 海底电缆 ..... 198c  
 海底电缆敷设 ..... 198f  
 海中电极 ..... 498c  
 夯实机 ..... 168b  
 航测内业 ..... 247d  
 航测外业 ..... 247c  
 航空目视选线 ..... 247b  
 航空摄影测量 ..... 247a  
 航片选线 ..... 247b  
 航摄像片选线 ..... 247b  
 合成变压器油 ..... 44b  
 合成绝缘子 ..... 293d, 472a  
 合成试验法(大功率试验) ..... 84b  
 合闸过电压 ..... 200a  
 河床演变 ..... 246e  
 荷电率(避雷器) ..... 276f  
 荷兰 KEMA 大功率实验  
     站 ..... 200c  
 恒压式空气断路器 ..... 299c  
 横向调节(变压器) ..... 125e  
 弧垂 ..... 250f  
 弧光接地过电压 ..... 200f  
 互感 ..... 385e  
 互静电感应系数 ..... 464c  
 互有电位系数 ..... 399c  
 户外高电压试验场 ..... 178f  
 护层保护器(电力电缆) ..... 290d  
 护线条 ..... 243f, 256a  
 滑闪现象 ..... 482e  
 化学交联 ..... 263c  
 化学树枝 ..... 264c  
 怀特黑德, E. R. (E. R. Whitehead) ..... 6a  
 环式配电网 ..... 345c  
 环烷基原油 ..... 44a

环网开关柜 ..... 201c  
 环氧电缆终端 ..... 201f  
 换流 ..... 202b  
 换流变压器 ..... 203a  
 换流变压器保护 ..... 507e  
 换流单元 ..... 204b  
 换流电路 ..... 205a  
 换流阀 ..... 205e  
 换流阀触发系统 ..... 207f  
 换流阀冷却系统 ..... 223b  
 换流器 ..... 209a  
 换流器保护 ..... 507f  
 换流器闭锁和解锁 ..... 212c  
 换流器触发控制 ..... 511b  
 换流器触发相位控制 ..... 212f  
 换流器工况图 ..... 213d  
 换流器故障 ..... 215f  
 换流器投差动保护 ..... 508a  
 换流器控制 ..... 499a  
 换流器旁路 ..... 218c  
 换流器运行特性 ..... 219a  
 换流器直流电压平均值 ..... 210f  
 换流桥 ..... 205d, 490c  
 换流桥交流过电流保护 ..... 508a  
 换流桥交直流差动保护 ..... 507f  
 换流站 ..... 221b  
 换流站避雷器 ..... 221f  
 换流站冲击波吸收电  
     容器 ..... 222e  
 换流站辅助设施 ..... 222f  
 换流站高频阻塞装置 ..... 223e  
 换流站交流部分故障 ..... 223e  
 换流站交流滤波装置 ..... 224c  
 换流站开关设备 ..... 225c  
 换流站平面布置 ..... 226a  
 换流站无功功率补偿  
     设备 ..... 226d  
 换流站直流滤波装置 ..... 227d  
 换流站主接线 ..... 227f  
 换位杆塔 ..... 161b  
 换相 ..... 229a  
 换相电抗 ..... 231b  
 换相电流 ..... 231b

换相电压 ..... 231b  
 换相过程 ..... 210f  
 换相角 ..... 210f, 230f  
 换相期间 ..... 230f  
 换相失败 ..... 212a, 216a, 231e  
 换相压降 ..... 231b  
 回归分析法(负荷预测) ..... 341f  
 回流方式 ..... 232a  
 回流线(电力电缆) ..... 103b  
 回路包络平衡法(电缆故障  
     搜寻) ..... 109a  
 混合型静止补偿装置 ..... 283d  
 混合型 T 接线夹 ..... 7f  
 霍弗特, H. H. (H. H.  
     Hoffert 1897) ..... 306c  
 霍赫施泰德, M. (M.  
     Hochstadter  
     1911) ..... 127d, 357e  

 击穿 ..... 265c  
 击穿保险器 ..... 233a  
 击穿率 ..... 308d, 453f  
 击距(雷电) ..... 6a  
 机械保护金具 ..... 243a  
 机械连接器 ..... 101b  
 机械扫描电子示波器 ..... 322a  
 积算仪表 ..... 130c  
 基本冲击绝缘水平 ..... 130f  
 极化指数 ..... 290f  
 极性翻转试验 ..... 487a  
 集肤效应 ..... 385b  
 记录仪表 ..... 130b  
 记忆示波器 ..... 322c  
 季节系数(接地电阻  
     测量) ..... 273e  
 继电保护盘室照明 ..... 31d  
 继发逆弧 ..... 217f  
 加荷器 ..... 457c  
 加拿大皮斯河流域 500 kV  
     变电所 ..... 233b  
 架空成束导线 ..... 289a  
 架空地线 ..... 233f

架空地线截面选择 ..... 234a  
 架空电缆 ..... 236d  
 架空配电线路 ..... 349d  
 架空配电线路设计施工 ..... 237a  
 架空输电线路 ..... 240c  
 架空输电线路金具 ..... 241b  
 架空输电线路可靠性 ..... 244e  
 架空输电线路设计勘测 ..... 245b  
 架空线 ..... 248a  
 架空线力学计算 ..... 250d  
 架空线微风振动 ..... 253b  
 架空线永久性伸长 ..... 256b  
 架空线状态方程式 ..... 257e  
 架线施工 ..... 257e  
 架线施工机具 ..... 261a  
 间隔棒 ..... 244a  
 间隔式开关柜 ..... 156a  
 间接作业法(带电作业) ..... 375d  
 监控和数据收集系统 ..... 354f  
 检修致接头(电力电缆) ..... 113d  
 减压比(空气压缩机) ..... 300a  
 建弧率 ..... 308e  
 江苏横山 220 kV 变电所 ..... 262d  
 降低温度法(架线施工) ..... 256f  
 降压变压器 ..... 10a  
 降阻剂 ..... 262f  
 交叉互联 ..... 290b  
 交错式线圈 ..... 125d  
 交叠式线圈 ..... 125d  
 交接试验 ..... 182e  
 交联聚乙烯电缆 ..... 263b  
 交流地网 ..... 264d  
 交流电抗表 ..... 265e  
 交流电压表 ..... 265e  
 交流电压试验 ..... 264f  
 交流二次电源 ..... 17a  
 交流分压器 ..... 177e  
 交流功率表 ..... 265f  
 交流励磁机静止整流器  
     励磁 ..... 439b  
 交流励磁机旋转整流器  
     励磁 ..... 439c  
 交流滤波器 ..... 224c

交流滤波器保护 .....	508d	金属栅片式磁吹断路器 .....	79b	绝缘导线 .....	289a
交流仪表 .....	265d	紧凑型换流站 .....	494a	绝缘电缆接头 .....	290a
交直流并联联网 .....	421c	紧凑型输电线路 .....	277b	绝缘电阻测量 .....	290e
交直流电力系统动态		进户线 .....	274f	绝缘耐火电缆 .....	103d
模拟 .....	502a	近区短路故障试验 .....	295f	绝缘配合 .....	291a
交直流混合输电 .....	267b	近区故障 .....	144d	绝缘配合惯用法 .....	291c
交直流输电并联运行 .....	267a	经低值阻抗接地 .....	348b	绝缘配合简化统计法 .....	291d
郊区配电 .....	324b	经济输送容量 .....	278b, 372f	绝缘配合统计法 .....	292c
接触电动势 .....	267e	晶闸管阀 .....	206a	绝缘屏蔽(电力电缆) .....	102e
接触电动势系数 .....	268a	晶闸管阀辅助电路 .....	278b	绝缘绕包机 .....	100b
接触电压 .....	267f	晶闸管控制变压器型静止		绝缘寿命试验 .....	292d
接地 .....	268d	补偿装置 .....	280a	绝缘水平 .....	293a
接地变压器 .....	269f	晶闸管控制电抗器型静止		绝缘套管 .....	310d
接地刀 .....	190c	补偿装置 .....	280c	绝缘板片式磁吹断路器 .....	79d
接地电阻 .....	270b	晶闸管投切电抗器型静止		绝缘子 .....	293b
接地电阻测量 .....	272f	补偿装置 .....	48e	均压环 .....	244d
接地电阻测量仪 .....	266f	晶闸管投切电容器型静止			
接地极 .....	273f	补偿装置 .....	281a		
接地极引线保护 .....	508d	晶闸管整流器 .....	69e		
接地体 .....	273f	精测定点法(电缆故障			
接地线 .....	273f	测寻) .....	109e		
接地摇表 .....	266f	静补 .....	282c		
接地引下线 .....	273f	静电电压表 .....	177b		
接地装置 .....	273f	静电聚焦变换管 .....	35b		
接户线 .....	274f	静态无功补偿装置 .....	47f		
接户线与进户线 .....	274f	静油电缆 .....	176b		
接零 .....	268e	静止补偿滤波装置 .....	282a		
接头壳体(电力电缆) .....	525f	静止补偿装置 .....	282e		
接头坑(电力电缆) .....	121f	静止补偿装置继电保护 .....	284f		
接续金具 .....	242d	静止补偿装置试验 .....	285d		
截波 .....	275b	静止补偿装置运行检修 .....	286a		
截波冲击绝缘水平 .....	275b	静止无功发生器 .....	286e		
截波冲击耐受电压 .....	275b	静止型动态无功补偿			
截波系数 .....	275c	装置 .....	282e		
截波装置 .....	275d	纠结连续式线圈 .....	125a		
解列过电压 .....	275f	纠结式线圈 .....	125a		
介质损耗因数 .....	276a	酒杯型塔 .....	161c		
介质损耗因数测量 .....	276a	局部放电试验 .....	287e		
金属导线回流方式 .....	232d	矩形波冲击电流发生器 .....	65e		
金属化膜并联电容器 .....	55c	聚氯乙烯电缆 .....	288c		
金属化纸并联电容器 .....	55c	聚乙烯电缆 .....	288e		
金属铠装式开关柜 .....	156a	绝对静电电压表 .....	177c		
金属氧化物避雷器 .....	276d	绝缘剥切工具 .....	100b		



## 卡布拉巴萨直流输电

工程 .....	294a
卡伦鲍尔变换 .....	464e
卡门纳街 .....	253c
卡普兰双频回路 .....	85a
开断电感负载过电压 .....	294e
开断电容负载过电压 .....	295a
开断能力试验 .....	82b
开断与关合电容器组	
试验 .....	296d
开断与关合试验 .....	295d
开关柜 .....	297c
开关柜试验 .....	297f
开关站 .....	298a
开启式开关柜 .....	62d
开通时间 .....	278d
抗电炭浪管 .....	364c
可懂度系数 .....	390b
可关断晶闸管 .....	206c
可见电晕电流 .....	138a
可控饱和电抗器型静止	
补偿装置 .....	298c
可同系数(架空输电	
线路) .....	245b
克里德, E. P. (E. P.	

Krider 1970)	306e
克里米亚型塔	161e
空冷调相机	436e
<b>空气断路器</b>	<b>299a</b>
空气湿度校正系数	460d
空气压缩机	300a
<b>空气压缩系统</b>	<b>299e</b>
空芯式电抗器	97c
空载变压器开断试验	297a
空载架空线路操作试验	296e
<b>控制电缆</b>	<b>300c</b>
控制室照明(变电所)	31b
<b>跨步电动势</b>	<b>301d</b>
跨步电动势系数	301f
<b>跨步电压</b>	<b>301d</b>
跨越杆塔	161b
快速加载法(杆塔基础 试验)	455f
<b>快速接地开关</b>	<b>302c</b>
快速移相	513a
矿物变压器油	44a
矿物绝缘电缆	103d
<b>魁北克水电局研究所大 功率实验站</b>	<b>302e</b>
<b>魁北克水电局研究所高压 实验室</b>	<b>303a</b>
<b>魁北克—新英格兰直流 互联系统</b>	<b>303d</b>
扩径导线	249a

## L

拉线杆塔	160f
拉线金具	244d
拉线 V 型塔	162a
蜡类涂剂	21a
勒博(Lebeau 1900)	312d
雷	304c
雷暴日	304c
雷暴小时	304c
<b>雷电</b>	<b>304a</b>
雷电波冲击电流发生器	65d
<b>雷电参数</b>	<b>304d</b>
雷电冲击保护比	150c

雷电冲击残压	150a
雷电冲击伏-秒特性	68b
雷电冲击系数	193c
<b>雷电定位系统</b>	<b>306b</b>
<b>雷电观测</b>	<b>306c</b>
<b>雷电观测站</b>	<b>306d</b>
<b>雷电过电压</b>	<b>308b</b>
雷电流波形	304e
雷电流的最大陡度	139c
雷电流陡度概率分布	305e
雷电流幅值概率分布	305c
雷电流极性	305f
<b>雷击跳闸率</b>	<b>308c</b>
<b>雷纳第大功率实验站</b>	<b>308e</b>
雷纳第高压实验室	151b
<b>雷云</b>	<b>309a</b>
<b>雷云放电过程</b>	<b>309c</b>
冷冻分段法(电缆故障 测寻)	109f
<b>冷缩电缆终端</b>	<b>310b</b>
离散化模型法(直流输电 仿真)	513e
理想屏蔽系数(电力 电缆)	112d
利用系数(接地体)	270c
利用系数曲线(照明 灯具)	314d
例行试验	182e
连接金具	242b
连接组标号	39d
<b>连续地线</b>	<b>310d</b>
连续式线圈	125a
联合电压试验	157f
联络线	374a
两次连续换相失败	216f
两点法(冲击电压试验)	67e
<b>两线一地制配电</b>	<b>310e</b>
两相颠覆	216f
<b>列宁格勒国立工业大学 高电压实验室</b>	<b>311d</b>
邻近效应(分裂 导线)	365f, 385c
<b>临界档距</b>	<b>311f</b>

临界电流开断试验	297b
临界电流值(断路器)	295e
临界击距(避雷线)	6c
灵活的交流输电系统	423c
零值绝缘子	460f, 471e
<b>刘家峡—关中输电线路</b>	<b>312a</b>
刘天关线	312a
流动波	467e
六氟化硫电缆	474a
<b>六氟化硫断路器</b>	<b>312c</b>
<b>六氟化硫绝缘变压器</b>	<b>313c</b>
六氟化硫气体	312d
六氟化硫气体绝缘式电压 互感器	135c
六脉动换流器	210c
六脉动换流站	221c
六相制与多相制交流 输电	422e
漏气点测寻(电力电缆)	110b
漏油点测寻(电力电缆)	109f
陆地电极	497d
<b>路灯灯具</b>	<b>313e</b>
<b>路灯供电方式</b>	<b>314c</b>
<b>路灯控制</b>	<b>315e</b>
<b>路灯照明</b>	<b>316e</b>
轮胎式单斗液压挖掘机	167c
罗戈夫斯基线圈	66a
螺栓型耐张线夹	242a
螺栓型设备线夹	8c
螺栓型 T 接线夹	7d
螺旋式线圈	125d
落地罐式六氟化硫断 路器	313b
铝合金绞线	248d
铝绞线	248d
滤波电抗器	97f

## M

<b>马尼夸根—蒙特利尔输电 线路</b>	<b>318a</b>
埋设机(电缆敷设)	100a
麦凯克伦, K. B. (K. B. McEachron 1939)	307e

脉冲法(电缆故障测寻) .....	109c
慢速维持法(杆塔基础 试验) .....	455e
慢性故障(变压器) .....	38d
猫头型塔 .....	161d
<b>美国电力研究所输电线路</b>	
力学实验场 .....	318d
门型杆塔 .....	161f
米利肯(Millikan 1926) .....	482e
密里根型导体 .....	535c
灭弧电压(避雷器) .....	150a
模量电流矩阵 .....	464d
模量电压矩阵 .....	464d
模量系统的波动方程 .....	464d
膜纸复合介质并联电容器 ...	53b
母线固定线夹 .....	9a
<b>母线接地开关</b> .....	319b
母线接地器 .....	319b
母线伸缩节 .....	9e
母线式电流互感器 .....	128d
<b>母线选择</b> .....	319e
木牛(电缆安装) .....	99f
穆瓦桑(Moissan 1900) .....	312d

**N**

<b>耐火电缆</b> .....	321a
<b>耐雷水平</b> .....	321a
耐热铝合金绞线 .....	248e
耐污绝缘子 .....	293e
耐张段 .....	251f
耐张杆塔 .....	161a
耐张换位 .....	378c
耐张线夹 .....	241e
耐张压接管 .....	241f
耐张转角杆塔 .....	161b
难燃电缆 .....	103c
<b>内部过电压</b> .....	321c
内部过电压倍数 .....	193b,321c
<b>内部过电压测量</b> .....	321e
内部过电压模拟装置 .....	196f
内层耐火电缆 .....	103d
<b>内绝缘</b> .....	323a
内拉线抱杆分解组塔 .....	171f

内屏蔽(电力电缆) .....	102e
内屏蔽式线圈 .....	125b
内桥接线 .....	362a
内燃凿岩机 .....	167f
尼戈尔,O.(O. Nigol 1974) .....	89f
<b>逆变侧交流电网故障</b> .....	323b
逆变器 .....	209a
逆变站 .....	221c
逆弧(汞弧阀) .....	206a
逆闪络(雷电) .....	152b
年负荷曲线 .....	339a
<b>粘性浸渍纸绝缘电缆</b> .....	323e
扭式防振锤 .....	255e
农村变电所 .....	324c
农村配电 .....	324b
<b>农村配电网</b> .....	324a
农网 .....	324a

**O**

<b>耦合地线</b> .....	326a
<b>耦合系数</b> .....	326b

**P**

<b>爬电比距</b> .....	327a
爬电距离 .....	327a
排管电缆 .....	111d
排管孔心棒 .....	99f
排气式避雷器 .....	195b
盘形悬式绝缘子 .....	395c,471b
旁路对(换流桥) .....	218f
抛物线法(架空线力学 计算) .....	250f
配电 .....	407c
<b>配电变电所</b> .....	327c
<b>配电变电所运行检修</b> .....	328e
<b>配电变电所噪声</b> .....	330a
配电变压器 .....	327f
<b>配电变压器防雷</b> .....	330e
配电技术经济 .....	420a
配电所 .....	327c
<b>配电网</b> .....	331e
<b>配电网电能损耗</b> .....	333d
<b>配电网电压等级</b> .....	334a

<b>配电网电压调整</b> .....	334f
<b>配电网调度所</b> .....	335e
<b>配电网调度运行</b> .....	336e
<b>配电网调度自动化</b> .....	337a
<b>配电网负荷密度</b> .....	338c
<b>配电网负荷曲线</b> .....	338f
<b>配电网负荷特性</b> .....	339e
<b>配电网负荷同时率</b> .....	341a
<b>配电网负荷预测</b> .....	341c
<b>配电网故障</b> .....	342b
<b>配电网规划</b> .....	342e
<b>配电网计算机辅助管理</b> .....	343d
<b>配电网结构</b> .....	344d
<b>配电网日负荷率</b> .....	346d
<b>配电网容载比</b> .....	347a
配电网设备利用率 .....	347b
<b>配电网无功补偿</b> .....	347d
配电网线损 .....	333d
配电网信息传输 .....	337d
配电网遥测 .....	338a
配电网遥控 .....	337e
配电网遥信 .....	337f
配电网运动装置 .....	337c
<b>配电网中性点接地方式</b> .....	348a
配电网中性点运行方式 .....	348a
配电系统 .....	407c
<b>配电线路</b> .....	349c
配电线路带电作业 .....	353b
<b>配电线路低压绝缘子</b> .....	350b
<b>配电线路防雷设施</b> .....	351b
<b>配电线路运行检修</b> .....	352c
配电线自动化 .....	355b
<b>配电装置</b> .....	353e
<b>配电自动化</b> .....	354c
配光曲线(照明灯具) .....	314d
喷射式水冲洗(带电作业) ...	12d
反尔逊Ⅲ型曲线法(气象 条件确定) .....	400a
频率表 .....	266c
品质因数 .....	180c
<b>平波电抗器</b> .....	356c
<b>平顶山—武昌输电线路</b> .....	356f
平均增长率法(负荷	

预测) ..... 341f

平面油箱 ..... 125f

平武线 ..... 356f

屏蔽 ..... 179f

屏蔽环 ..... 244d

**屏蔽型电缆 ..... 357c**

破坏荷重试验(线路金具) ..... 458b

破坏性放电试验 ..... 265c

**普通阀式避雷器 ..... 357f**

普通晶闸阀 ..... 206a

**Q**

启动电动机启动 ..... 440e

启动电抗器 ..... 97e

气流干扰线 ..... 91f

气体绝缘变电站 ..... 359b

**气体绝缘金属封闭电器 ..... 359a**

**气体绝缘金属封闭电器**

**布置 ..... 360b**

**气体绝缘金属封闭电器**

**电缆终端 ..... 360e**

牵引机(架线施工) ..... 261a

铅酸蓄电池 ..... 468c

前行波 ..... 467f

前行混合波 ..... 433c

**潜供电弧 ..... 361b**

潜供电流 ..... 361d

欠补偿(消弧线圈) ..... 465f

强电控制 ..... 13e

桥臂短路 ..... 217c

桥差保护 ..... 507f

桥阀 ..... 205d

**桥形接线 ..... 362a**

壳式变压器 ..... 124c

切空变过电压 ..... 294e

切空线过电压 ..... 295a

切向应力(电力电缆) ..... 101f

侵入波防护 ..... 19e

轻型机动绞磨 ..... 174a

氢冷汽轮机 ..... 436e

清晰度系数 ..... 390b

**球雷 ..... 362c**

区调 ..... 335f

**区域变电所 ..... 362e**

区域调度所 ..... 335f

**全波冲击绝缘水平 ..... 362f**

全波冲击耐受电压 ..... 362f

全补偿(消弧线圈) ..... 465f

全电压启动 ..... 440a,512e

全封闭母线 ..... 363c

**全封闭母线选择 ..... 363c**

全伏-秒特性 ..... 68b

全绝缘作业法(带电作业) ..... 376d

全开断时间 ..... 143f

全面电晕 ..... 387b

全年时间负荷曲线 ..... 339c

全水内冷调相机 ..... 436f

全张力接续金具 ..... 242d

**R**

绕击 ..... 5f,453f

绕击暴露面 ..... 6c

**绕击电气几何模型 ..... 364a**

绕击率 ..... 5f,308e,453f

绕组 ..... 124e

热雷云 ..... 309a

热膨胀试验机 ..... 453a

**热缩电缆终端 ..... 364a**

热稳定电流 ..... 84a

热稳定试验 ..... 82c

热循环试验(线路金具) ..... 459c

人工换相 ..... 231f

**人工污秽试验 ..... 364d**

**日本东京电力公司 500 kV**

**变电所 ..... 364f**

日负荷曲线 ..... 338f

日最大负荷年变动曲线 ..... 339b

容性耦合系数 ..... 399d

熔断器 ..... 185f

熔断 ..... 101a

**人口电容 ..... 365d**

软横担 ..... 457a

软激发 ..... 435d

软母线 ..... 365f

**软母线选择 ..... 365f**

弱电控制 ..... 14b

**S**

**塞止电缆接头 ..... 367a**

三倍频电压试验 ..... 265d

三叉手套 ..... 364d

**三分之四断路器接线 ..... 367d**

三角定位原理(雷电观测) ..... 307c

三角形接线 ..... 147b

**三柱式隔离开关 ..... 368a**

伞裙 ..... 361d

瑟瑞(Thury 1889) ..... 490e

闪 ..... 304c

闪测仪法(电缆故障测寻) ..... 109e

闪光报警装置 ..... 14e

闪击电荷(雷电) ..... 306b

闪络 ..... 265c

上顶盖法兰密封式油箱 ..... 125f

**上海闸北一杨树浦电缆**

**工程 ..... 368c**

**上行雷 ..... 368f**

上字型杆塔 ..... 161d

**少油断路器 ..... 369a**

设备金具 ..... 7f

设计洪水位 ..... 246f

升降法(冲击电压试验) ..... 67e

**升压变压器 ..... 369d**

升压变压器抽分接头降压

启动 ..... 140e

生理眩光 ..... 317d

声压级 ..... 330c

失步开断 ..... 144b

失步开断与关合试验 ..... 296a

失谐摆 ..... 91a

失谐摆锤 ..... 244c

湿耐受试验 ..... 370c

湿闪络试验 ..... 370c

湿式交联 ..... 263d

**湿试验 ..... 370b**

十二脉动换流器 ..... 212b



石蜡基原油 .....	44a
事故分析信号 .....	15a
事故警报信号 .....	14f
试验变压器 .....	370d
试验线段 .....	371c
试验性变电站 .....	179a
视觉诱导(道路照明) .....	317e
视在波前时间(雷电冲击 波形) .....	66b
手车式开关柜 .....	371e
首开相系数 .....	83e
受端电网 .....	374c
枢纽变电所 .....	372a
输电 .....	407c
输电补偿 .....	46f
输电干线 .....	374a
输电技术经济 .....	119d
输电能力 .....	372c
输电容量 .....	372c
输电网 .....	407c
输电网络 .....	373c
输电系统 .....	407c
输电线路磁场 .....	374f
输电线路带电作业 .....	375d
输电线路导线换位 .....	377f
输电线路导线截面选择 .....	379c
输电线路电场 .....	383d
输电线路电气参数 .....	384d
输电线路电气设计 .....	386c
输电线路电晕 .....	386f
输电线路定位 .....	388f
输电线路防雷设计 .....	389e
输电线路干扰影响 .....	389f
输电线路感性耦合影响 .....	391a
输电线路故障 .....	391e
输电线路检测 .....	247b
输电线路环境电磁 .....	393c
输电线路技术经济指标 .....	393c
输电线路建设总投资 .....	393e
输电线路交叉跨越 .....	394b
输电线路接地设计 .....	394e
输电线路绝缘设计 .....	394f
输电线路绝缘子 .....	397d

输电线路可听噪声 .....	397d
输电线路路径选择 .....	398b
输电线路容性耦合影响 .....	399a
输电线路设计用气象 条件 .....	399e
输电线路通道 .....	400f
输电线路危险影响 .....	401d
输电线路维修 .....	402d
输电线路污秽等级 .....	403a
输电线路无线电干扰 .....	403b
输电线路巡视检测 .....	404a
输电线路走廊 .....	400f
输电线路阻性耦合影响 .....	406b
输配电 .....	407b
输配电电磁与环境影响 .....	409b
输配电电压等级 .....	411a
输配电技术标准 .....	412d
输配电技术经济 .....	419d
输配电技术展望 .....	420f
输配电简史 .....	423e
输配电设施与环境协调 .....	425a
输电网的无功补偿与 电压调整 .....	426b
输送能力(输电线路) .....	372c
树脂浇注式电流互感器 .....	128e
树脂浇注式电压互感器 .....	135e
数字存储示波器 .....	322c
数字记录仪 .....	178b
数字式万用表 .....	525c
数字仪表 .....	130b
衰减振荡波 .....	67c
甩负荷过电压 .....	427c
双断路器接线 .....	427e
双分裂变压器 .....	152f
双回下字型塔 .....	162e
双回路倒伞型塔 .....	162e
双回路鼓型塔 .....	162d
双回路伞型塔 .....	162d
双极系统 .....	492f
双极直流输电系统 .....	492d
双极直流线路 .....	192d
双母线带旁路母线接线 .....	428a
双母线单分段接线 .....	428f

双母线分段带旁路母线 接线 .....	428d
双母线分段接线 .....	428f
双母线接线 .....	429c
双母线双分段接线 .....	429a
双桥换流器 .....	212b
双桥换流站 .....	221d
双调谐滤波器 .....	224d, 282c
双压式 SF <sub>6</sub> 断路器 .....	313a
双柱式隔离开关 .....	429f
双柱水平伸缩式隔离 开关 .....	430b
双柱水平旋转式隔离 开关 .....	430a
水底电缆 .....	198c
水断路器 .....	139d
水幕式水冲洗 .....	12d
水平式连续硫化 .....	261a
水树枝 .....	264c
瞬时充气式空气断路器 .....	299b
斯托克布里奇防振锤 .....	255c
四极法 .....	430c
松东李线 .....	155d
送端电网 .....	374c
苏联北方大功率实验站 .....	430e
苏联直流输电研究院高压 技术部 .....	431a
随用随算法(换流器 仿真) .....	514c
索伦森(Sorensen 1926) .....	482e
	
他激 .....	435d
塔腿直埋式基础 .....	163b
太平洋联络线 .....	432a
弹性记忆 .....	364c
弹性系数法(负荷预测) .....	342a
碳化硅避雷器 .....	149e
掏挖式基础 .....	163b
套管 .....	432e
套管式电流互感器 .....	128f
特高压输电 .....	421e
特性线法 .....	433c

特征谐波 .....	514f
提高应力法(架线施工) .....	257b
<b>天津北郊 500 kV 变电所</b> ...	<b>434e</b>
调节电抗器 .....	446a
调节电抗器 .....	98a
铁磁谐振 .....	73b
铁磁谐振的跃变 .....	435e
<b>铁磁谐振过电压</b> .....	<b>435c</b>
铁芯 .....	124b
铁芯式电抗器 .....	97d
通信电缆 .....	13b
通信电缆屏蔽系数 .....	112e
通信室照明 .....	31f
同步电机自励磁 .....	73d
同步互联 .....	421a
<b>同步调相机</b> .....	<b>436d, 48b</b>
<b>同步调相机故障</b> .....	<b>437d</b>
<b>同步调相机继电保护</b> .....	<b>438a</b>
<b>同步调相机检修</b> .....	<b>438d</b>
<b>同步调相机励磁</b> .....	<b>438f</b>
<b>同步调相机起动方法</b> .....	<b>440a</b>
<b>同步调相机试验</b> .....	<b>441d</b>
<b>同步调相机运行控制</b> .....	<b>442b</b>
同步自励磁 .....	61b
同相调节 .....	125c
同轴引线(电缆) .....	290d
铜铝过渡接触板 .....	8e
统包绝缘层 .....	85f
统包型电缆 .....	85f
统计过电压 .....	62b
突发短路试验 .....	82f
突发性故障 .....	38d
图上选线 .....	398d
<b>土壤电阻率</b> .....	<b>442f</b>
脱谐度(消弧线圈) ...	463b, 463f

W

瓦尔特, B. (B. Walter	
1902) .....	306c
瓦斯保护 .....	37d
瓦斯继电器 .....	37d
外部过电压 .....	195e
外层耐火电缆 .....	103d

<b>外绝缘</b> .....	<b>445a</b>
外绝缘工频干试耐受	
电压 .....	193c
外绝缘工频湿试耐受	
电压 .....	193d
外拉线抱杆分解组塔 .....	171e
外屏蔽(电力电缆) .....	102e
外气压供油箱 .....	72b
外桥接线 .....	362a
外推法(负荷预测) .....	341f
万能基础 .....	457a
万用表 .....	525b
<b>网络法</b> .....	<b>445b</b>
网架 .....	374a
网孔电动势 .....	268a
网络保护器 .....	187d
网络式配电网 .....	345d
网络试验 .....	84b
<b>网络试验站</b> .....	<b>445f</b>
<b>危险波曲线</b> .....	<b>446c</b>
威廉斯顿 500 kV	
变电所 .....	233c
微波通信站防雷保护 .....	19d
尾接电抗器 .....	68f
魏尔合成回路 .....	84d
温纳(Wenner)法(接地电阻	
测量) .....	430d
温升试验 .....	82d
稳态电击 .....	409d
稳态工频过电压 .....	192b
压力试验(线路金具) .....	459a
污层电导率 .....	364e
污害故障 .....	392b
污秽耐受试验 .....	364e
污秽网络 .....	446d
污秽网络试验 .....	364e
<b>污闪</b> .....	<b>446d</b>
污闪故障 .....	392b
<b>屋内配电装置</b> .....	<b>446e</b>
屋内配电装置照明 .....	31e
屋内式配电变电所 .....	328b
<b>屋外配电装置</b> .....	<b>447f</b>
屋外配电装置照明 .....	31d

屋外式配电变电所 .....	328b
无功补偿装置 .....	46d
无功电能表 .....	266b
无功负荷曲线 .....	338f
无功功率 .....	46d
无功功率表 .....	266a
无励磁分接开关 .....	42a
无励磁调压装置 .....	41f
<b>无人值班变电所</b> .....	<b>448f</b>
无刷励磁 .....	439c
无污染电缆 .....	103f
无线电干扰电压 .....	183d
无线电干扰特性曲线 .....	183e
无相控理想空载直流	
电压 .....	209f
无源滤波器 .....	282a
无张力接续金具 .....	242f
<b>武汉高压研究所高压</b>	
<b>实验室</b> .....	<b>449b</b>
物理交联 .....	263c
误触发(晶闸管阀) .....	217a
误开通(晶闸管阀) .....	217a
<b>雾闪</b> .....	<b>449e</b>



<b>西安高压电器研究所大</b>	
<b>功率实验站</b> .....	<b>450a</b>
西林电桥 .....	276c
吸收比(绝缘介质) .....	290f
硒整流器 .....	69e
锡焊 .....	100e
<b>下行雷</b> .....	<b>450d</b>
<b>厦门集美—高崎海底电缆</b>	
<b>工程</b> .....	<b>450d</b>
<b>先导</b> .....	<b>451a</b>
现场选线 .....	398c
现浇基础 .....	163a
<b>限流电抗器</b> .....	<b>451b</b>
<b>限流电抗器选择</b> .....	<b>451e</b>
限流型高压熔断器 .....	186a
限值控制(换流器) .....	511e
<b>线路导线试验</b> .....	<b>452a</b>
<b>线路防雷</b> .....	<b>453c</b>

线路杆塔基础试验 .....	455a
线路杆塔试验 .....	456e
线路金具试验 .....	458a
线路绝缘水平 .....	459f
线路力学实验站 .....	462a
线路曲折系数 .....	394a
线路容载比 .....	347d
线圈 .....	124e
线损率 .....	333e
线性谐振过电压 .....	462d
线轴式绝缘子 .....	350c
箱式变电站 .....	463c
箱式并联电容器 .....	55c
箱式开关柜 .....	156a
详勘(输电线路) .....	245b
相对空气密度 .....	183a
相绝缘层 .....	85f
相模变换法 .....	464a
相位补偿 .....	426f
相位调节 .....	125e
相序翻转 .....	465a
象鼻电缆终端 .....	465b
橡塑电缆 .....	194d
消弧电抗器 .....	97e
消弧线圈 .....	465d
消弧线圈接地 .....	348c
避雷器 .....	466c
小弧垂导线 .....	249e
效益系数(自耦变压器) .....	534e
楔型耐张线夹 .....	242a
斜角波伏-秒特性 .....	68b
斜式油箱 .....	125f
谐波分析仪 .....	266e
谐波流向仪 .....	266e
谐振过电压 .....	466f
泄漏比距 .....	327a
泄漏电流试验 .....	487a
心理眩光 .....	317d
芯绝缘层(电力电缆) .....	85f
芯式变压器 .....	124c
新所泽 500 kV 变电所 .....	365a
新信浓变频站 .....	467b
信噪比 .....	403d

行波 .....	467e
形状系数(接地体) .....	270d
型式试验 .....	182d
续流(避雷器) .....	149e,195c
蓄电池 .....	468b
蓄电池室照明 .....	31e
蓄电池直流电源 .....	16d
悬臂抱杆分解组塔 .....	171f
悬垂式连续档 .....	251f
悬垂线夹 .....	241c
悬垂转角杆塔 .....	161b
悬浮抱杆分解组塔 .....	171f
悬空换位 .....	378d
悬链塔 .....	162b
悬链线法(架空线力学 计算) .....	250e
悬链线连续硫化 .....	263f
悬式绝缘子 .....	471b
旋转电机防雷 .....	472b
选线(输电线路) .....	398b
选线按钮 .....	14d
选线控制 .....	14c
选相合闸开关 .....	446a
循环加载法(杆塔基础 试验) .....	456a

## Y

压接 .....	100f
压接管 .....	110f
压接钳 .....	100b
压力电缆 .....	127d
压力供油箱 .....	71f
压力箱 .....	71f
压气(SF <sub>6</sub> )绝缘电缆 .....	474a
压缩型设备线夹 .....	8d
压缩型丁接线夹 .....	7e
延迟触发角 .....	210d
延迟线 .....	83f
岩石锚桩基础 .....	164a
岩石钻机 .....	168a
盐雾喷雾试验(线路 金具) .....	459f
盐雾法(污秽试验) .....	364f

阳极半桥 .....	209b
阳极换相组 .....	209b
氧化锌避雷器 .....	149d,276e
氧指数 .....	103f
摇表 .....	291a
遥感方法勘测 .....	247a
药包焊 .....	101a
液压提升装置 .....	173a
一次配电电压 .....	331f
一次配电线路 .....	527f
一个半断路器接线 .....	474c
一线一地制配电 .....	310f
伊尔河非同步联络站 .....	474f
伊泰普直流输电工程 .....	475b
移动起重机分解组塔 .....	172b
移动起重机整立杆塔 .....	171c
移动式变电站 .....	328c
移动式带电水冲洗 .....	12b
乙丙橡胶电缆 .....	475e
异步自励磁 .....	61b
异相接地试验 .....	296b
易击区(雷电) .....	454e
意大利电工技术试验中心 大功率实验站 .....	476a
意大利电工技术试验中心 高压实验室 .....	476c
意大利 Lecco 铁塔实 验站 .....	476e
阴极半桥 .....	209b
阴极换相组 .....	209b
阴极射线示波器 .....	306e
音频脉动控制装置 .....	337e
应变(架空线) .....	256c
应力管(电缆安装) .....	121a
应力控制带 .....	310c
英法海峡直流输电 工程 .....	477b
迎面先导 .....	478b
硬激发 .....	435d
硬母线 .....	478c
硬母线选择 .....	478b
用户变电所 .....	479a
用户自动化 .....	355f

尤曼, M. A. (M. A. Uman 1970) ..... 306e

油处理设施 ..... 21d

油道和导体 ..... 335b

油浸变压器温升限值 ..... 45d

油浸串级式电压互感器 ..... 135e

油浸三相五柱式电压互感器 ..... 135d

油浸式并联电抗器 ..... 51b

油浸式单相电压互感器 ..... 135c

油浸式电流互感器 ..... 128f

**油浸纸绝缘电缆 ..... 479c**

油流法(电缆故障探测) ..... 110a

油压钳 ..... 100b

有功负荷曲线 ..... 338f

有相控理想空载直流电压 ..... 210c

有效覆盖范围(雷电观测) ..... 307c

有效接地 ..... 348b

有效临界档距 ..... 252d

有效屏蔽(避雷线) ..... 6c

有源换相 ..... 231b

有源滤波器 ..... 282d

有载分接开关 ..... 42b

有载调压装置 ..... 42b

余光(雷电) ..... 309e

预防性试验 ..... 182e

预告信号 ..... 14f

预浸渍纸绝缘电缆 ..... 60e

预算电度表 ..... 356a

预张拉法(架线施工) ..... 257c

**预制电缆终端 ..... 479d**

**元宝山—锦州—辽阳输电线路 ..... 480a**

元锦辽线 ..... 480a

圆筒式线圈 ..... 124f

**远距离输电 ..... 480c**

**远离法 ..... 481e**

超前触发角 ..... 211f

超前关断角 ..... 211f

允许载流量 ..... 453b

运行年负荷曲线 ..... 339b

**Z**

在线自动记录 ..... 322f

暂时工频过电压 ..... 192b

**暂时过电压 ..... 482a**

暂态电去 ..... 409c

暂态记录仪 ..... 178b, 322c

暂态网络分析仪 ..... 196f

凿岩机 ..... 167e

张力放线 ..... 259e

张力机 ..... 261d

张力架线法 ..... 259d

拐弧角 ..... 244d

兆欧表 ..... 525c

折射波 ..... 468a

折射系数 ..... 468b

针式绝缘子 ..... 350c, 395b

针式支柱绝缘子 ..... 484b

真空泵车 ..... 100c

**真空断路器 ..... 482b**

**真空接触器 ..... 483a**

真空净油车 ..... 100c

真空式负荷开关 ..... 157b

振荡回路试验 ..... 84b

**振荡回路试验站 ..... 483b**

振动试验(线路金具) ..... 458c

振幅系数 ..... 83e

振子示波器 ..... 321f

蒸镀电极并联电容器 ..... 55a

蒸汽交联 ..... 263d

整立杆塔 ..... 170f

**整流侧交流电网故障 ..... 483d**

整流器 ..... 209a

整流桥直流端子短路 ..... 218b

整流式仪表 ..... 266d

整流站 ..... 221c

**正变换过电压 ..... 484a, 331b**

正极半站 ..... 221e

正极性放电 ..... 305f

正上行雷 ..... 368f

**支柱绝缘子 ..... 484a**

指示仪表 ..... 129e

直击 ..... 453c

直击雷防护 ..... 19a

**直击雷过电压 ..... 484d**

直角电缆终端 ..... 479f

直接试验法(大功率试验) ..... 84b

直连式象鼻电缆终端 ..... 465b

直流冲击电容器 ..... 222e

直流电抗器 ..... 356c

**直流电缆 ..... 484f**

**直流电缆线路 ..... 485c**

直流电流表 ..... 524e

**直流电流互感器 ..... 485e**

直流电流控制 ..... 511c

直流电压表 ..... 525a

**直流电压互感器 ..... 486b**

直流电压控制 ..... 511d

**直流电压试验 ..... 486e**

**直流断路器 ..... 487b**

直流分压器 ..... 177e

**直流高电压发生器 ..... 488c**

直流功率表 ..... 525a

**直流架空线路 ..... 489a**

直流开关场设备保护 ..... 508b

直流离子流场 ..... 410d

直流励磁机励磁 ..... 439a

直流滤波器 ..... 227e

直流滤波器保护 ..... 508c

**直流输电 ..... 490b**

**直流输电电磁与环境影响 ..... 494d**

**直流输电工程系统试验 ..... 495e**

直流输电基本控制 ..... 199d

**直流输电接地电极 ..... 497c**

**直流输电控制方式 ..... 498f**

**直流输电控制系统分层结构 ..... 500e**

**直流输电联网功能 ..... 501f**

**直流输电系统动态模拟 ..... 502a**

**直流输电系统仿真装置 ..... 502c**

**直流输电系统过电压 ..... 503c**

**直流输电系统计算 ..... 504c**

**直流输电系统继电保护 ..... 506e**

**直流输电系统绝缘配合 ..... 508f**

**直流输电系统可靠性 ..... 509d**

**直流输电系统控制 ..... 510f**

直流输电系统起停 .....	512b	中央信号装置 .....	14e	自振角频率 .....	462d
直流输电系统数字仿真 .....	513b	终端变电所 .....	529a	自阻尼导线 .....	249c
直流输电系统谐波 .....	514d	终端杆塔 .....	161b	综合护层(电力电缆) .....	195a
直流输电系统运行特性 .....	516b	终勘(输电线路) .....	245b	综合屏蔽系数(电力	
直流输电系统运行维护 .....	517e	钟罩式油箱 .....	125f	电缆) .....	112f
直流输电系统自动再		重力供油箱 .....	71e	综合用电水平法(负荷	
启动 .....	518e	舟山直流输电工程 .....	529d	预测) .....	341f
直流输电线路 .....	519a	轴向应力(电力电缆) .....	102a	纵补偿 .....	480e
直流输电与交流输电 .....	519c	主变压器 .....	10a	阻波器 .....	97f
直流输电远动通信设施 .....	520e	主变压器选择 .....	530d	阻尼电抗器 .....	97f
直流调制 .....	267c	主放电 .....	531f	阻尼率 .....	463b
直流线路电参数 .....	521c	主放电通道波阻 .....	304d	阻尼式间隔棒 .....	244a
直流线路故障 .....	523c	柱板式基础 .....	163a	阻尼线 .....	255e
直流线路振荡阻尼电路 .....	524b	专门测量 .....	322f	阻尼型分压器 .....	178a
直流仪表 .....	524e	转角杆塔 .....	161a	阻燃电缆 .....	535e
直配电机 .....	472d	转镜型高速摄影机 .....	181a	阻容分压器 .....	322f
直升飞机分解组塔 .....	172d	桩式基础 .....	163e	组合电器 .....	535f
直升飞机整立杆塔 .....	171d	装配式基础 .....	163c	组合式负荷开关 .....	157c
直线电缆接头 .....	525d	装饰性灯具 .....	313f	组合式互感器 .....	136e
直线杆塔 .....	161a	状态方程法(直流输电		组合式配电变电所 .....	328c
直线换位 .....	378c	仿真) .....	513d	钻孔灌注桩基础 .....	163e
中国电力建设研究所线路		撞击型防振锤 .....	255e	钻扩机 .....	167d
杆塔实验站 .....	526a	子导线 .....	153b	作用电压(绝缘配合) .....	291c
中国电力科学研究院大		自饱和电抗器型静止补偿		座腿抱杆整立铁塔 .....	171b
功率实验站 .....	526f	装置 .....	531f		
中间并联补偿 .....	481a	自并励晶闸管励磁 .....	439c		
中间电网 .....	374d	自承式架空电缆 .....	236e		
中间电位作业法(带电		自动重合器 .....	532e		
作业) .....	376b	自动分段器 .....	533c		
中间静止补偿 .....	481b	自动配电开关 .....	533f		
中间开关站 .....	480d	自放电(蓄电池) .....	469c		
中间同步补偿 .....	481b	自复励晶闸管励磁 .....	439f		
中心程序法(换流器		自感 .....	385e		
仿真) .....	514b	自恢复绝缘 .....	182d		
中型屋外配电装置 .....	527a	自激 .....	435d		
中性点不接地 .....	348c	自静电感应系数 .....	464c		
中性点电抗器 .....	527c	自立式杆塔 .....	160f		
中性点调潜接地 .....	348c	自耦变压器 .....	534c		
中性点小电抗 .....	97e, 527d	自耦变压器降压起动 .....	440d		
中性点直接接地 .....	348b	自然功率 .....	535a, 60d, 372e		
中压架空配电线路 .....	527e	自容式充油电缆 .....	535a		
中压配电电压 .....	331f	自适应控制 .....	330d		
中压配电网 .....	528e	自有电位系数 .....	399c		

1型极值分布法(风速	
确定) .....	400b
15次冲击耐压试验 .....	68a
50%破坏性放电电压	
试验 .....	67d
50%闪络电压 .....	460f
CESI大功率实验站 .....	476a
DCP交联剂 .....	263d
EPR电缆 .....	475e
GIS .....	359b
IREQ大功率实验站 .....	302e
MI电缆 .....	103d
PE电缆 .....	288f
POF电缆 .....	175f
PVC电缆 .....	288c
SCADA系统 .....	337b, 354f
SF <sub>6</sub> 终端 .....	360f

SL 电缆 .....	154f	V 型隔离开关 .....	444a	αβ0 变换 .....	464e
T 接金具 .....	7d	XLPE 电缆 .....	263c	γδ0 换 .....	464e
TRV 上升率 .....	83e	Z 形变压器 .....	331d	AΠ 型塔 .....	162c

SL 电缆 .....	154f	V 型隔离开关 .....	444a	αβ0 变换 .....	464e
T 接金具 .....	7d	XLPE 电缆 .....	263c	γδ0 换 .....	464e
TRV 上升率 .....	83e	Z 形变压器 .....	331d	AΠ 型塔 .....	162c